

# 無人航空機システムにおける動的ネットワーク制御 技術に関する研究

著者	高石 大介
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第18199号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00122886">http://hdl.handle.net/10097/00122886</a>

# 博士學位論文

論文題目

無人航空機システムにおける  
動的ネットワーク制御技術  
に関する研究

提出者

東北大学大学院情報科学研究科  
応用情報科学専攻

学籍番号 B5ID4004

氏名 高石 大介

# 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 無人航空機システムの現状と課題	5
2.1 はじめに	5
2.2 無人航空機システムを利用したサービス	6
2.2.1 UAS サービスの分類	6
2.2.2 ネットワークトポロジによるサービスの分類	8
2.3 無人航空機システムで使用されている通信	10
2.4 無線資源割当手法の必要性	12
2.5 飛行軌道決定手法の必要性	14
2.6 まとめ	15
第3章 仮想的なセル構造を用いた効率的な周波数共用技術	17
3.1 はじめに	17
3.2 想定する無人航空機システム	18
3.2.1 想定環境	18
3.2.2 電波干渉と通信スループットに関する想定	21

---

3.2.3	UASにおける周波数共用の課題と目的 . . . . .	23
3.3	仮想セルを用いた空間多重手法 . . . . .	26
3.3.1	提案手法の概要 . . . . .	26
3.3.2	同時通信を実現するためのタイムスロット割当規則 . . . . .	29
3.3.3	フレーム構成 . . . . .	32
3.3.4	割当タイムスロットの決定手順 . . . . .	35
3.4	モビリティを考慮したパラメータ決定手法 . . . . .	37
3.4.1	パラメータ決定の概要 . . . . .	37
3.4.2	仮想セル半径の決定 . . . . .	39
3.4.3	スーパーフレーム長の決定 . . . . .	43
3.4.4	タイムスロット割当の最適化 . . . . .	48
3.5	評価及び解析 . . . . .	51
3.5.1	実験環境 . . . . .	52
3.5.2	実験1：空間多重の有効性評価 . . . . .	52
3.5.3	実験2：スーパーフレーム長決定手法の有効性評価 . . . . .	53
3.5.4	UAの地理的配置がスループットへ与える影響 . . . . .	55
3.6	まとめ . . . . .	59
第4章	複数UAの協調によるメッシュネットワークの構築	61
4.1	はじめに . . . . .	61
4.2	想定する無人航空機システム . . . . .	62
4.2.1	想定環境 . . . . .	62
4.2.2	メッシュネットワーク型無人航空機システムの分類 . . . . .	63
4.3	ネットワークモデルを用いた飛行軌道の決定手法 . . . . .	65
4.3.1	ネットワークのモデル化 . . . . .	65
4.3.2	評価実験 . . . . .	69
4.4	貪欲法による飛行軌道の決定手法 . . . . .	71

---

4.4.1	トラヒックを考慮した飛行軌道の動的制御 . . . . .	71
4.4.2	評価実験 . . . . .	74
4.5	まとめ . . . . .	77
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>79</b>
	著作物利用許諾	83
	発表文献一覧	87
	参考文献	91
	謝辞	97

# 図 目 次

2.1	UAS のサービスとネットワーク的特徴 . . . . .	6
2.2	UAS サービスのネットワークトポロジによる分類 . . . . .	8
2.3	STDMA による空間多重を考慮したタイムスロット割当 . . . . .	12
3.1	想定環境 . . . . .	19
3.2	提案手法のアプローチ . . . . .	27
3.3	セルグループ数と干渉セル間距離 . . . . .	29
3.4	タイムスロット割当規則の適用例 . . . . .	31
3.5	空間多重を考慮したタイムスロット割当て例 . . . . .	31
3.6	タイムスロットの空間的再利用を実現するためのフレーム構成 . . . . .	32
3.7	資源割当制御局によるタイムスロット割当て . . . . .	35
3.8	UA の静止環境において SIR が最小となる条件 . . . . .	40
3.9	UA の移動環境において SIR が最小となる条件 . . . . .	42
3.10	スーパーフレーム長がセル半径に与える影響 . . . . .	45
3.11	スーパーフレーム長がフレーム実効率 $\alpha$ に与える影響 . . . . .	46
3.12	割当サブフレーム長とスループット . . . . .	49
3.13	既存手法との比較による提案手法の有効性評価 . . . . .	53
3.14	ペイロード部の合計スループット . . . . .	54
3.15	合計スループットとフレーム実効率 . . . . .	55

---

3.16 UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が3 の場合） . . . . .	56
3.17 UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が4 の場合） . . . . .	57
3.18 UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が7 の場合） . . . . .	58
4.1 メッシュネットワーク型 UAS の概略 . . . . .	62
4.2 想定するメッシュネットワーク型 UAS . . . . .	66
4.3 六角形のセルを用いたネットワークモデル . . . . .	67
4.4 UA の配置密度がネットワーク性能に与える影響 . . . . .	71
4.5 UA-UA 間通信リンクの接続条件 . . . . .	72
4.6 貪欲法による UAS の飛行軌道決定 . . . . .	73
4.7 End-to-End の通信遅延 . . . . .	75
4.8 End-to-End の通信リンク接続率 . . . . .	76

# 表 目 次

2.1	無人航空機システムで使用されている周波数帯域 . . . . .	11
3.1	仮想セルに関するパラメータ定義 . . . . .	38
3.2	UAS に関するパラメータ定義 . . . . .	39
3.3	シミュレーションにおけるパラメータ設定 1 . . . . .	51
4.1	シミュレーションにおけるパラメータ設定 2 . . . . .	70
4.2	シミュレーションにおけるパラメータ設定 3 . . . . .	75





# 第1章

## 序論

### 1.1 本研究の背景

「空の産業革命」とも言われ、ここ数年で無人航空機システム (UAS: Unmanned Aircraft System) に対する需要が急速に拡大している [1]. その要因としては飛行制御技術や通信技術の高性能・小型化, 強化カーボン素材の低価格化などにより, 高性能で小型な無人航空機 (UA: Unmanned Aircraft) を安価で入手可能になったことが挙げられる. UAS とは通信機能を備えた UA とそれを制御する制御局や制御用ソフトウェアを含めたシステムの総称である. UA には利用用途に応じたセンサやカメラを搭載可能であり, 取得したデータは搭載された通信機器を用いて地上の制御局へリアルタイムで伝送される. 特に, 搭載カメラによる空撮映像は飛行時や離着陸時の操縦支援として利用される他, 精密農業やインフラ管理, 警備等のサービスにおいても, 対象の観察や観測, 測量を目的として利用されることが想定されている. また, 平時以外の利用として, 損壊した無線通信設備の代わりとなり被災地域に通信環境を提供するといった UA の利用方法にも注目が集まっている [2,3]. 複数台の UA を用いてメッシュネットワークを構築することに

より、被災地域内でのデータ中継のみならず、被災地域外との通信接続を確立することが可能となる。

このような産業用 UAS の市場は年々拡大しており、UAS の機体とサービスを合わせた国内の市場は 2016 年度には 200 億円程度であったが、2020 年度には 1100 億円に達するといった調査結果も発表されている [4]。そのため、今後、大容量のデータ伝送を必要とする UAS の数が増加し、近傍空域内で多数の UAS が運用されることが想定される。一方、UAS において使用可能な周波数帯域は限られており、現在普及している産業用 UAS のほとんどでは、2.4GHz の ISM (Industry Science Medical) 帯や 1.2GHz ライセンスバンドが使用されている。2.4GHz の ISM 帯は、Wi-Fi や Bluetooth 等の既存の通信機器との周波数競合が発生するため、十分な通信速度を達成できないことが課題となっている。他方、1.2GHz 帯はアナログバンドという特性上、UAS 間での周波数共用が困難であり同時通信を行った際に混信が発生することが課題となっている。こういった UAS の急速な普及による周波数の逼迫が背景となり、日本では 2016 年に無線局免許を必要とする無人移動体用の周波数帯域として 169MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯が新たに整備された [5, 6]。しかし、現在の UAS の普及速度を鑑みると、新たな周波数帯域においても周波数帯域の逼迫が今後課題になると考えられる。

限られた周波数帯域を効率的に利用するためには、効率的な周波数共用を可能とする無線資源割当手法が必要である。無線資源割当に関する既存研究では、空間的な周波数の再利用を考慮した資源割当手法の提案が行われてきた。これらの手法はノードの位置情報を基に同時通信可能な通信リンクを決定し、タイムスロットの割当が行うものである。しかし、UA のような高いモビリティを持つ環境においては、移動によって位置情報が絶えず変化するため、ノードの静的な環

境を想定した既存手法では空間的な周波数の再利用が出来ない場合が存在する。そのため、多数の UAS が近傍空域内に展開されるネットワーク環境においては、UA のモビリティや位置情報を考慮した動的な資源割当決定手法が必要である。他方、UA の飛行軌道を適切に制御することによっても周波数の効率的な利用が可能である。UA の飛行軌道を制御するため、飛行軌道が制限される観察や測量等を行う UAS のサービスにおいては不適であるが、被災地域上空に展開されるメッシュネットワークにおいては、発生しているトラヒックを基に UA の配置や飛行軌道を決定することで期待される通信速度を向上することが可能である。そのため、通信状況を考慮した UA の動的な飛行軌道決定手法が必要である。このように、UAS における通信では、UA のモビリティやネットワーク環境を考慮した動的ネットワーク制御技術が必要とされている。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、多数の UAS が展開されるネットワーク環境に対して、UA のモビリティを考慮したネットワークの動的制御を行うことで効率的周波数利用を実現することが目的である。前節で述べた通り、多数の UAS が各々の UAS 内で閉じた通信を行うネットワーク形態においては、UAS の位置情報やモビリティを基に空間的な周波数の再利用を考慮した無線資源の割当を決定することで、効率的な周波数の共用を実現する。他方、多数の UA を用いてメッシュネットワークを構築するネットワーク形態では、通信状況を基に UA の飛行軌道を動的に制御することで、スループットの向上及び通信遅延の低下を実現する。

本研究の完遂は、UAS の周波数利用効率向上のためのネットワーク動的制御手法の確立を意味する。これにより、多数の UAS からの大容量データ伝送の需要

を収容することが可能となり，UAS の発展に寄与することが予想される．また，本研究を発展させることで UAS のみならず他の無線通信システムにおける効率的な周波数利用の基盤技術が構築され，将来の無線通信システムの基礎を築くことができる．

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．

第 1 章は序論であり，本研究の背景とその目的について述べた．

第 2 章では，UAS で利用されている既存の通信技術と既存研究について述べる．更に，UAS のネットワーク構成の分類として，UA と地上局間通信による情報収集ネットワークと複数 UA によるワイヤレスメッシュネットワークの構築について説明を行う．

第 3 章では，仮想的なセル構造を用いた資源割当システムを提案する．さらに，UA のモビリティを考慮したパラメータの最適化手法について説明を行う．提案手法の性能について数値解析を行い，既存手法との比較により提案手法の有効性を検討する．

第 4 章では，複数の UA によって構成されるワイヤレスメッシュネットワークにおける，飛行軌道の動的制御手法について提案を行う．更に，既存手法との比較により提案手法の有効性を検討する．

第 5 章は結論であり，本論文のまとめである．

## 第2章

# 無人航空機システムの現状と課題

### 2.1 はじめに

無人航空機システム（UAS: Unmanned Aircraft System）は多様な機器を機体に搭載可能であり，且つ高いモビリティを持つため，その柔軟性の高さから様々なサービスでの利用が期待されている．本章ではまず，検討が進められている，あるいは既に運用が開始している UAS を用いたサービスと特徴について整理する．次に，利用形態やネットワークトポロジの点から UAS を分類し，通信やネットワークの点における技術課題を整理する．技術課題に対する解決策として，アドホックネットワークやセンサーネットワーク，WMN(Wireless Mesh Network)などの研究分野でこれまでに検討されてきた関連研究について述べる．そして，これらの関連研究を UAS に適用したときの課題について指摘する．

## 2.2 無人航空機システムを利用したサービス

本節では，UAS を用いたサービスや通信規格など，通信に関する現状と取り組みについて述べる．

### 2.2.1 UAS サービスの分類

UAS は非常に多くの業界や分野において注目を集めており，UAS に必要とされる通信性能はサービス毎に大きく異なる．そのため，想定するサービスを特定せずに UAS の通信について議論を行うことは適切ではない．本研究では初めに，データ伝送速度と通信距離の点から代表的な UAS サービスの分類を行う．

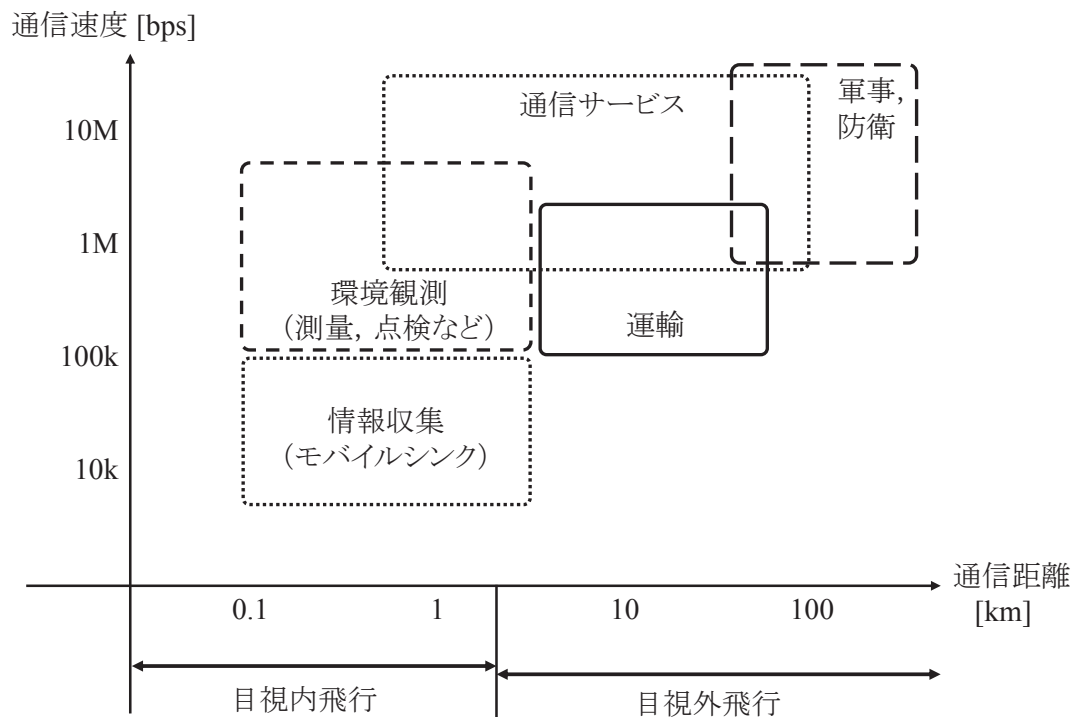


図 2.1: UAS のサービスとネットワーク的特徴

図 2.1 に代表的な UAS サービスと UAS に要求される通信の性能を示す。現在、既に運用が開始している産業用 UAS のサービスをその目的から大別すると、環境観測、情報収集、軍事・防衛のいずれかに分類することができる。情報収集サービスは火山に設置されたセンサノードや動物に装着されたセンサーノードなど、フィールド内に配置されたセンサーノードから情報を収集するサービスである [7]。無人航空機（UA:Unmanned Aircraft）を移動可能な情報収集ノード、すなわちモバイルシンク、として利用する情報収集サービスでは、伝送データがセンサの測定値やテキストデータであるため、UAS では数 10kbps～数 100kbps 程度の通信速度が要求される。他方、測量や点検などの UA が取得した高精細な空撮映像を利用する環境観測サービスでは、伝送されるデータ量が大きく、UAS には数 100kbps～数 Mbps 以上の通信速度が必要となる。また、通信距離もサービスによって大きく異なる。精密農業や測量などの環境観測サービスは田畑や橋梁などのフィールドを対象とするため、数 100m～数 km の範囲内で UA が運用される。対して、軍事・防衛で利用される UAS ではより長距離の通信が必要とされる。

サービスの開始が期待される UAS のサービスとして、UA を用いた運輸が注目を集めている。日本においては、経済産業省が 2017 年に発表した「空の産業革命に向けたロードマップ」で示されるように、2020 年までに有人地帯での目視外飛行による運輸が目標として掲げられ、法整備や環境整備が進められている。また、UA を用いた運輸に関する取り組みは、国外においてもその実現に向けた検討が活発に進められており、Amazon.com や Google など様々な企業において実証実験が行われてきた。運輸を行う UA の飛行状況を UAS の運輸事業者がリアルタイムで確認するため、運輸を行う UAS サービスでは目視外距離での映像伝送が必要とされている。そのため、数 10km 程度の範囲内において数 100kbp～数



Mbps 程度の通信が必要である。

他方、通信サービスを提供する手段としても UAS は期待を集めている [8–12]。このサービスは、災害発生直後の被災地域や離島などのネットワーク孤立地域に対して、データ中継が可能な UAS を展開することで、平時と変わらない通信網を構築するものである。フィールド内に存在する多数の地上通信端末に対して通信接続環境を構築するため、このようなサービスを実現する UAS では長距離で高速な通信が必要となる。

### 2.2.2 ネットワークトポロジによるサービスの分類

UAS を利用したサービスはネットワークトポロジの点からも分類することが可能である。UAS においてネットワークトポロジとは、UA-UA 間の通信リンクの有無や UA-地上局間の通信リンクの有無を意味する。図 2.2 に UAS を利用したサービスをネットワークトポロジの観点から分類した結果を示す。ネットワークトポロ

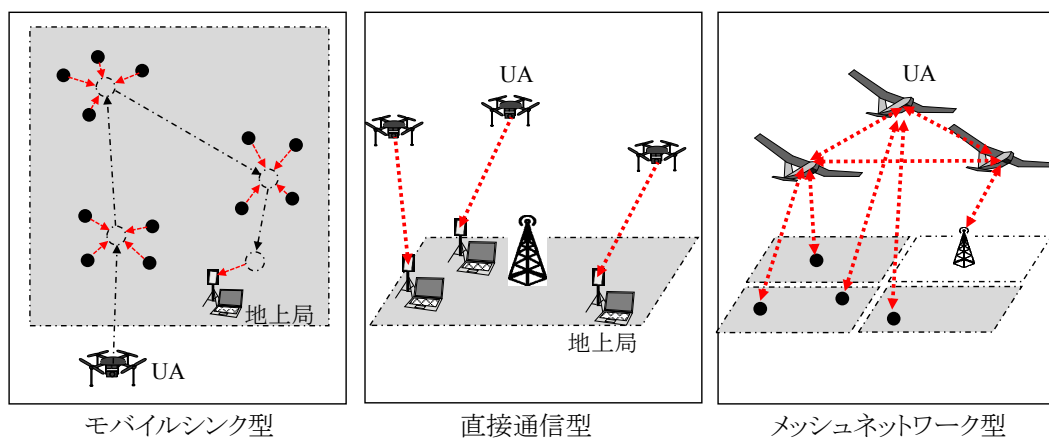


図 2.2: UAS サービスのネットワークトポロジによる分類

ジの観点からはUASは大きく3つに分類できる。1つがモバイルシンク型のネットワークトポロジを持つUASである。このネットワークでは、UAがフィールド内を移動しセンサノードやアドホック端末からデータ収集を行う [13-17]。ネットワーク内の通信端末とは近接したときにのみリンクが接続され、通信が行われる。通信が行われない期間は、各通信端末においてデータを保持することが必要であるため、蓄積伝送を行うためのDTN(Delay Tolerant Network)機能 [18,19]が搭載される。つまり、モバイルシンク型のUASではUAのモビリティを活用した通信が行われる。一般的に、情報収集サービスはこのネットワークトポロジに該当し、一台、若しくは少数のUAのモビリティを活用することで火山や森林などの広範囲をカバーすることが可能である。

他方、直接通信型のネットワークトポロジを持つUASは、UAと地上局が常時通信可能な範囲で運用される [20-23]。UAに搭載されたカメラやセンサ類が取得した情報は、自身の地上局に対してリアルタイムで伝送される。精密農業や点検検査、測量などの環境観測サービスはこのネットワークトポロジを想定したものが大半を占める。さらに、UASによる物流においても、UAが取得した映像データは運行支援として利用されるため、このネットワークトポロジに該当する。

メッシュネットワーク型のネットワークトポロジは、複数のUAが相互に通信することでメッシュネットワークを構築するものである。UA-UA間の通信リンクのみならず、フィールド内に点在する多数の地上通信ノードとの通信リンクも構築することで、地上ノード間で発生したデータの中継を行うことが可能である。そのため、被災地域や離島などの通信孤立地域において通信環境を構築するUASサービスはこのネットワークトポロジに該当する。

## 2.3 無人航空機システムで使用されている通信

表 2.1 に UAS で使用されている周波数帯域を示す。現在, UAS における通信では, 主に 2.4GHz 帯の ISM(Industry Science Medical) バンドが使用されている。一部では 920MHz 帯が使用されているが, 送信時間に関する制限があり, 2.4GHz と比較すると UAS での利用は少ない。2.4GHz 帯は Wi-Fi や bluetooth, 電子レンジなどで使用されている周波数帯域であり, 既存機器との干渉を避けるために, UAS では周波数ホッピング (FHSS:Frequency Hopping Spread Spectrum) や CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) などの周波数共用技術が使用されている [24, 25]。しかし, いかに周波数共用技術によって干渉を回避したとはいえ, 既存通信機器との干渉が完全に無視できるわけではない。

このような背景を受けて, 2016 年に無人移動体のための新たな周波数として, 169MHz, 2.4GHz, 5.7GHz 帯が確保された。これら帯域は無線局免許や無線従事者資格を必要とする帯域であるため, 既存の ISM バンドと比べて競合する機器数が少なく, 十分な通信速度を達成することが可能である。免許を必要とする周波数帯域としてはこれまで 1.2GHz が利用可能であったが, アナログ転送による映像伝送を行う帯域であるため, 高精細な映像データを行うことが困難であった。そのため, 169MHz, 2.4GHz, 5.7GHz 帯は高精細な映像データを伝送する帯域として非常に注目を集めている。しかしながら, 現在の UAS の著しい普及速度を鑑みると, 1.2GHz, 2.4GHz, 5.7GHz の周波数帯域においても周波数の逼迫が課題となることが考えられる。そのため, 限られた帯域を効率的に利用することが必要である。

本研究では,「直接通信型」と「メッシュネットワーク型」の UAS において, 上記の周波数チャネルを効率的に利用するためのネットワーク制御手法に注目する。

表 2.1: 無人航空機システムで使用されている周波数帯域

周波数帯	利用形態	無線局免許	無線従事者資格	備考
73MHz	操縦用, 不要	不要	ラジコン用微弱無線局	
920MHz	操縦用	不要	不要	テレコントロール用特定小電力無線局
2.4GHz	操縦, 画像伝送用	不要	不要	2.4GHz 帯小電力データ通信システム
1.2GHz	画像伝送用	要	第三級陸上特殊無線技士以上	アナログ方式限定
169MHz	操縦, 画像伝送用	要	第三級陸上特殊無線技士以上	無線移動体画像伝送システム
2.4GHz	操縦, 画像伝送用	要	第三級陸上特殊無線技士以上	無線移動体画像伝送システム
5.7GHz	操縦, 画像伝送用	要	第三級陸上特殊無線技士以上	無線移動体画像伝送システム

## 2.4 無線資源割当手法の必要性

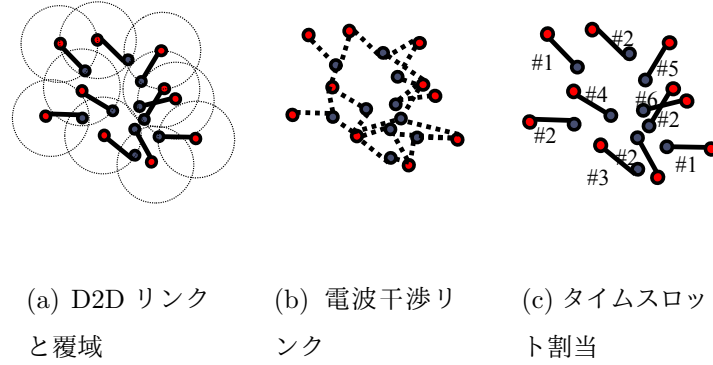


図 2.3: STDMA による空間多重を考慮したタイムスロット割当

UA と地上局が 1 対 1 の通信を行う直接通信型の UAS においては、UA-地上局間の効率的なデータ伝送が必要となる。つまり、空撮映像を自身の地上局に対して伝送する多数の UAS が、同一または近傍の空域内で運用される場合に、これら UAS が効率的に周波数を共用する資源割当手法が必要となる。

効率的な周波数共用に関する研究は D2D(Device-to-Device) の分野において盛んに行なわれてきた [26–29]。D2D 通信は、通信端末とアクセスポイント間の通信に代表されるような多対 1 のトポロジではなく、各送信ノードの宛先がそれぞれ異なる 1 対 1 の通信リンクが複数共存するトポロジを持つ。多対 1 のトポロジにおいては複数の送信局が同時に宛先への送信を行うと受信局で電波の干渉が発生するため、周波数共用の効率化は各送信局での回線交換の効率化に帰着することができる。一方、D2D 通信の場合は送信局の宛先は様々であり、複数の送信局が同時に通信を行っても電波の干渉が発生しない場合が存在する。したがって、D2D 通信の効率化は、送信局と受信局の位置関係に基づき、同時に通信

しても干渉しない通信ノード群で同時通信を図ることで周波数利用効率の向上を図る，空間多重手法の効率化に帰着することができる．

空間多重に関する代表的な研究として，STDMA (Spatial Time Division Multiple Access) といった手法が提案されている [30–34]．これらの研究では，送信局と受信局の D2D リンクに基づき電波の覆域を計算し，電波干渉を示すグラフを作成する．その後，電波干渉グラフを適切に分割することで，空間多重可能な通信端末を決定する．同時通信が可能な送信局群に対しては，同一のタイムスロットを割当ててすることで，空間多重を図る．

既存手法では送信局と受信局の位置情報により空間多重を行うことで，各送信局が利用可能な無線資源が増加し，高いスループットを実現可能である．しかし，既存手法では送信局と受信局の位置情報を基に電波干渉グラフを作成するため，モビリティによってユーザ分布が変化した際に，同時通信が不成立となるといった課題が存在する．既存手法をモビリティのないセンサネットワーク環境下や，LTE(Long Term Evolution)-advanced のような高性能な制御サーバーが存在したり，高品質な制御用回線が存在するなど，制御に必要な情報の収集や割当が高速で行える環境下で適用した場合には，このような課題は発生しない．しかし，UAS の利用シーンにおいては，UA は高いモビリティを持ち，高性能な制御サーバーや高品質な制御用回線が存在しない場合があり，既存手法の UAS への適用は困難である．そのため，UAS のためのモビリティを考慮した効率的な資源割当手法が必要である．

## 2.5 飛行軌道決定手法の必要性

前節で述べた無線資源割当の決定による周波数の効率利用の他に，UASにおいては，UAの飛行軌道によってもその通信性能が大きく変化する．無線通信では通信距離によって，通信遅延やスループットなどの通信品質が変化するため，モビリティを持つUASにおいてはその飛行軌道がこれらの通信性能に影響を与えるためである．環境観測や運輸などのUASサービスでは，そのサービスの目的を達成するために飛行軌道が決定されるため，通信品質を向上するための飛行軌道制御を行うことは現実的ではない．しかしながら，被災地域や離島などにおいて，複数のUAを用いて通信環境を構築するサービスにおいては，通信品質を最大化するためのUAの飛行軌道決定が必要である．WMNの研究分野においては，MR(Mesh Router)の最適化配置に関する検討がこれまで行われてきた [35–38]．しかしながら，MRはモビリティを持たないため，UASのように高いモビリティを持つ環境下においては適用が困難である．特に，長時間の飛行が可能な固定翼型UAを想定した場合には，固定翼型UAはホバリング機能を有さないため，UAは旋回飛行し通信距離が連続的に変化する．メッシュネットワーク型のUASにおいては，このような環境下における適切な飛行軌道の決定が必要である．

## 2.6 まとめ

本章では、近年注目されている UAS を用いたサービスや無線通信規格などの国内外における動向を述べた。UAS はその多様性から様々な分野において注目を集めており、ネットワーク形態もサービスごとに異なる。そこで本研究では、UAS をネットワークの特徴やネットワークトポロジの観点から分類した。特に注目を集めている「直接通信型」の UAS と「メッシュネットワーク型」の UAS については、周波数利用の点から技術課題について説明した。さらに、これら技術課題に対する解決策として、アドホックネットワークや D2D, WMN の分野において検討されてきた手法について説明し、これら関連研究の課題について指摘した。次章以降では、関連研究の課題を解決する手法として、UAS のモビリティを考慮したネットワークの動的制御手法について述べる。第3章では、直接通信型の UAS における効率的な無線資源割当手法について述べる。第4章では、メッシュネットワーク型の UAS における UA の動的飛行軌道決定手法について述べる。





## 第3章

# 仮想的なセル構造を用いた効率的な周波数共用技術

### 3.1 はじめに

多数の無人航空機システム（UAS: Unmanned Aircraft Systems）が近傍空域内で運用される環境では，限られた周波数帯域を効率的に共用するための無線資源割当手法が必要である．本章では，UAS の特徴の一つである UA のモビリティを考慮した効率的無線資源割当手法について論じる．まず，想定するネットワーク環境について説明し，多数の UAS が周波数を共用する場合の課題を指摘する．そして，周波数帯域の効率利用を目的として，仮想的なセル構造を用いた資源割当手法の提案を行う．仮想的なセル構造に関するパラメータにおいては，無人航空機（UA: Unamennd Aircraft）のモビリティを考慮した最適値の決定手法を提案し，UAS における周波数共用の課題を解決する．シミュレーションにより提案手法の有効性について評価を行うとともに，提案手法の性能について数学的解析を行う．

## 3.2 想定する無人航空機システム

本節では、想定する無人航空機システムの運用シナリオについて述べる。また、UAS で使用する周波数帯域や通信方式などの無線通信に関する想定についてまとめる。その後、複数の UAS に対する効率的な資源割当手法の目的と課題について論じる。

### 3.2.1 想定環境

現在、商用として普及している UAS の多くは、1 台の UA を 1 台の地上局（プロポやパソコンなど）によって制御を行うものである。UA に搭載されたカメラが撮影したリアルタイムの映像データは、常に自身の地上局に対してのみ伝送され、他の地上局に対しては伝送を行わない。前章で述べたように、このような UA と地上局が直接通信を行うネットワークトポロジを想定した UAS のサービスは多い。精密農業やインフラ管理、警備、測量などの環境観測サービスや運輸では、このようネットワークトポロジを用いて取得した映像データを使用することでサービス目的が達成される。更に、これらのサービスでは UA のモビリティを活用することで、広域あるいは多視点からの映像データの取得が可能である。

本研究では、このような UA と地上局が 1 対 1 で通信を行う直接通信型のネットワークトポロジを想定する。UAS のサービスとしては環境観測を想定し、各 UA は自身の地上局から数 100m の範囲内で運用されるものとする。本章においては、1 台の UA と 1 台の地上局の通信ペアを 1 つの UAS と定義し、以後の説明を行う。図 3.1 に本研究で想定する UAS の運用シナリオを示す。本研究では、同一または近傍の空域内に多数の UAS が展開及び運用される環境を想定する。そ

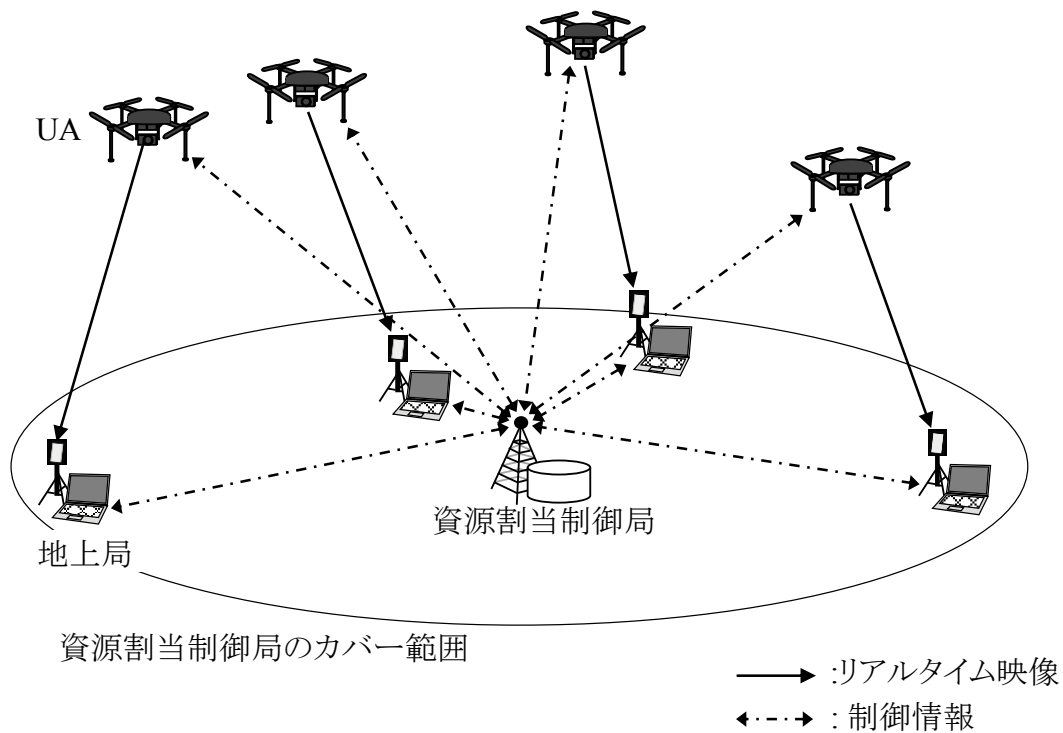


図 3.1: 想定環境

それぞれの UAS においては、UA から地上局に対して撮影したリアルタイム映像データの伝送を行う。リアルタイムの映像データを対象とするため、UA と地上局間で通信リンクの途絶が発生した場合には、該当部の映像データの再送は行わずに破棄するものとする。フィールド内には1台の資源割当制御局が設置されており、全 UAS の無線資源の管理を行う。つまり、多数の UAS は資源割当制御局のカバー範囲内に展開され、資源割当制御局に割当てられた無線資源を用いて通信を行う。また、資源割当制御局は可搬型の簡易的な基地局を想定し、計算資源は限られているものとする。

UAS 内でのデータ伝送で使用する周波数帯域は、2016 年に新たに整備された 169MHz 帯、2.4GHz 帯、5.7GHz 帯を想定する。これらの周波数帯域は複数の周

波数チャネルから構成されるチャネル構成を持つ。そのため、各 UAS 毎に異なる周波数チャネルを使用することで電波干渉を回避することが可能である。しかしながら、これまでの UAS の普及速度を鑑みると、近傍空域内で運用される UAS 数が新たに整備された帯域の周波数チャネル数以上となることは明らかである。そのため、1つの周波数チャネルで複数の UAS を収容するための無線資源割当手法が今後必要となる。そこで本研究では、最も基本的な想定環境として、ネットワーク内で利用可能な周波数チャネル数を1つとする。フィールド内の全ての通信は1つの周波数チャネルを共用し、リアルタイムの映像データ伝送を行う。なお、本研究においては周波数チャネル数を1として提案及び解析を行うが、複数チャネル環境下においても本研究の成果を適用することが可能である。

全 UAS は1つの周波数チャネルを共用しデータ伝送を行うため、時分割多重アクセス方式 (TDMA: Time Division Multiple Access) を用いて通信を行う。つまり、1つの周波数チャネルは複数のタイムスロットに分割され、通信毎に異なるタイムスロットを用いることで、無線干渉によるデータ伝送の失敗を回避することが可能である。各 UAS が使用するタイムスロットは、フィールド内に設置された1台の資源割当制御局による集中制御によって決定されるものとする。資源割当制御局は割当タイムスロットの決定を行うために、全 UAS から位置情報や移動速度などの情報を収集する。その際、各 UAS からの情報収集もまた無線通信によって行なわれるが、使用する周波数チャネルは、映像データ伝送で使用する周波数チャネルと同一のチャネルを共用する。同様に、資源割当制御局から全 UA と地上局に対してタイムスロット割当結果の通知を行う、この通信に関しても映像データ伝送と同一の周波数チャネルを使用する。各 UA と地上局は割当てられたタイムスロットのみを用いて通信を行うことで、近傍空域内で運用され

る UAS は各々の映像データ伝送を行う。

#### 3.2.2 電波干渉と通信スループットに関する想定

RQ-4 グローバルホークや Puma AE に代表される軍事・防衛用の大型 UAS においては、パラボラアンテナやパッチアンテナが度々使用されている [41]。これらのアンテナは指向性を持つため、長距離のデータ通信においても高いスループットを達成可能であり、数 10km 以上の範囲での映像伝送が可能である。しかしながら、UA のモビリティによってアンテナの向きが絶えず変化するため、高い利得を得るためには、送受信を行うアンテナを常に対向させるためのアンテナ自動追尾機構が必要となる。これにより、アンテナ全体の機構がより大型で重く、更には高額となる場合がある。他方、精密農業や測量等を行う商用の UAS では UA-地上局間の通信距離が数 100m 以内の範囲で使用される。そのため、指向性アンテナを搭載せずとも十分な通信速度を達成可能であり、商用の UAS では指向性を持つアンテナを搭載しないことが多い。これは、環境観測を行う UA は小型であり、積載可能な重量や大きさに制限があることも理由として考えられる。また、ホイップアンテナなどの水平面に対して無指向なアンテナは、向きを変えずとも常に一定のアンテナ利得が得られるといった利点もある。

本研究では、UA と地上局間距離が数 100m 程度の範囲内で運用される商用の UAS を想定する。UA の移動が生じた場合においても常に一定の利得を保証するために、全 UA 及び地上局は無指向のアンテナを持つものとする。全ての UA と地上局で同性能のアンテナを持つことを想定する。UA から発せられた電波は自由空間モデルに従い、受信電波強度は伝搬距離の 2 乗に反比例する環境を想定する。UAS<sub>u</sub> の UA から発せられた電波を地上局が受信した場合の受信電力  $P_{d_u}$  は、

フリスの伝達公式より，以下の式により導出することができる．

$$P_{d_u} = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d_u} \right)^2 G_t G_r, \quad (3.1)$$

ここで， $P_t$  は送信電力， $\lambda$  は搬送波の波長である． $G_t$  は送信アンテナの利得であり  $G_r$  は受信アンテナの利得である．また， $d_u$  は UAS $u$  の UA と地上局間の通信距離であり，UA と地上局間の水平距離  $h_u$  と高度差  $x_u$  から以下のように導出される．

$$d_u = \sqrt{h_u^2 + x_u^2} \quad (3.2)$$

TDMA 方式において任意の2つの UAS が異なるタイムスロットを用いて通信を行う場合には，相互の電波干渉は発生しない．そのため，地上局において UAS から送信された電波を正しく復調可能である条件は信号対雑音電力比（SNR:Signal-to-Noise Ratio）によって決定する．SNR は希望波に対しての雑音の強度がどの程度であることを示す指標であり，SNR が閾値  $\gamma_0$  以上となる場合にのみ復調可能である．復調可能な SNR の条件は以下の関係式で表される．

$$SNR = \frac{P_{d_u}}{N_0} \geq \gamma_0, \quad (3.3)$$

$N_0$  は白色雑音電力である．

他方，複数の UAS が同一のタイムスロット上で同時通信を行う場合には，雑音電力と比べて他の UAS からの干渉波電力が大きく支配的となる．このような環境において，希望波を復調可能な条件は希望波対干渉波電力比，即ち SIR(Signal-to-Interference Ratio) によって決定する．SIR は希望波に対しての干渉波電力の強度がどの程度であることを示す指標であり，閾値  $\gamma_0$  以上となる場合にのみ希望波を復調可能である．希望波を復調可能な SIR の条件は以下の関係式で表される．

$$SIR_u = \frac{P_{d_u}}{I_u} \geq \gamma_0, \quad (3.4)$$

ここで、 $I_u$  は UAS $u$  に対する干渉波電力の合計値である。つまり、 $I_u$  は UAS $u$  と同一のタイムスロットで通信を行った UA からの干渉波電力の合計値である。各干渉波についても受信点での電力は自由空間モデルに従う。

また、UAS $u$  における UA-地上局間の通信リンク容量  $\theta_u$  はシャノンハートレーの定理によって導出される理論限界値とする [40]。SIR が閾値  $\gamma_0$  を超えない場合はデータ受信不可能であることに注意すると、UAS $u$  のリンク容量は以下の式で表される。

$$\theta_u = \begin{cases} 0 & (SIR < \gamma_0) \\ B \cdot \log_2(1 + SIR_u) & (SIR \geq \gamma_0) \end{cases} \quad (3.5)$$

ここで、 $B$  は搬送波の帯域幅である。

### 3.2.3 UAS における周波数共用の課題と目的

前章で述べたように、効率的な資源割当に関する関連研究では、周波数利用効率の向上を目的として、多数の通信ノードが空間的にタイムスロットを再利用して通信を行う空間多重手法が提案されている。空間多重可能な通信リンクの決定では、送信局と受信局の位置情報を基に計算を行うため、通信ノードの移動が生じた場合に SIR が変化し、空間多重が成立しない場合がある。つまり、空間多重通信を行う通信ペアの通信が失敗する。ノードの移動が生じる毎に割り当てを更新することでこの問題を解決することは可能であるが、UAS のような資源割当制御局の計算能力が限られている場合には、このようリアルタイムの計算は困難である。つまり、これらの関連研究では、ノードのモビリティを考慮した空間多重化を行っていないことが課題である。そのため、UAS に対する無線資源割当では、UA の移動環境下においても常に全 UAS のデータ受信を保証することが必要



である。

また、これらの空間多重に関する関連研究では、各通信ノードが達成可能なスループットについては考慮されていない。これは、既存研究における目的関数は、全通信ノードの送信が完了するまでのタイムスロット数を最小にすることが設定されているためである。また、全送信ノードに割当てするタイムスロット数を1つとするとといった制約が設けられており、これらのことから、既存研究では空間多重する通信ノード数を最大にすることに目的が置かれているといったことが分かる。しかしながら、空間多重を用いたタイムスロット割当では、通信ノードの地理的分布によって各通信ノードのスループットは大きく異なる。UASのような環境では、十分なスループットを達成することができないUASは、リアルタイムの映像データを満足に伝送することが出来ないことが課題となる。そのため、UASに対する無線資源割当ではUAS毎のスループットのばらつき、即ちネットワーク内の最低スループット、を考慮した資源割当手法が必要である。

そこで本研究では、既存研究の課題を解決する資源割当手法を提案する。提案手法の目的は、以下の2つである。

1. ネットワーク内の最低スループットを最大化
2. 全UASのデータ受信を常に保証

ネットワーク内の全UASの集合を $\mathcal{U}$ としたとき、目的1は以下の式によって表される。

$$\min \{\theta_u | u \in \mathcal{U}\} \quad (3.6)$$

ここで、 $\theta_u$ は $UA_u$ から地上局 $u$ に対する通信スループットである。また、目的2は同一タイムスロットを用いた場合においても通信を保証するためのSIRに関

する条件であり，以下の式によって表される．

$$SIR_u \geq \gamma_0, \forall u \in \mathcal{U} \quad (3.7)$$

式(3.5)より， $SIR$ が閾値 $\gamma_0$ を超えない場合はスループットは0となるため，目的1は目的2を内包している．しかし，本研究では説明を簡略化するため，2つの目的について分け論じる．

次節では，これらの目的を達成するために，仮想的なセル構造を用いた効率的な無線資源割当手法を提案する．

### 3.3 仮想セルを用いた空間多重手法

本節では、仮想的なセル構造を用いた資源割当手法を提案する。提案手法では、空間分割法を用いて空間的にタイムスロットの再利用が可能な UAS を決定する。また、全 UAS のデータ受信を保証するための無線資源割当規則について導入する。

#### 3.3.1 提案手法の概要

本研究では、空間分割法を用いた資源割当手法について提案する。提案手法は、既存手法のような干渉リンクの分割を用いた空間多重ではなく、エリアを分割することで電波干渉する UAS を一意に決定することが可能である。また、セルによるエリアに基づいて空間多重するユーザを決定するので、モビリティによる影響を緩和することが可能となる。

提案手法の概要を図 3.2 に示す。提案手法では資源割当制御局のカバー範囲を多数の正六角形のセルに仮想的に分割し、同時通信が可能な UAS を決定する（以後、正六角形の仮想的なセルを“仮想セル”と呼称し説明を行う）。全ての仮想セルは同一のセル半径  $r$  を持ち、資源割当制御局のカバー範囲内に規則的に敷き詰められる。各仮想セル内に新たな基地局等は不要であり、全仮想セルは資源割当制御局によって管理される。そのため、携帯電話におけるセルラーネットワークとはネットワークトポロジは異なる。

次に、提案手法では、ネットワーク内の全 UAS が位置する仮想セルを決定する。ネットワーク内の UA と地上局は GPS(Global Positioning Systems) 等の位置推定技術を基に、自身が属する仮想セルを判断する。ここで、各 UA と地上局が属する仮想セルは自身を内包するセルであり、他のセルには属さないものとす

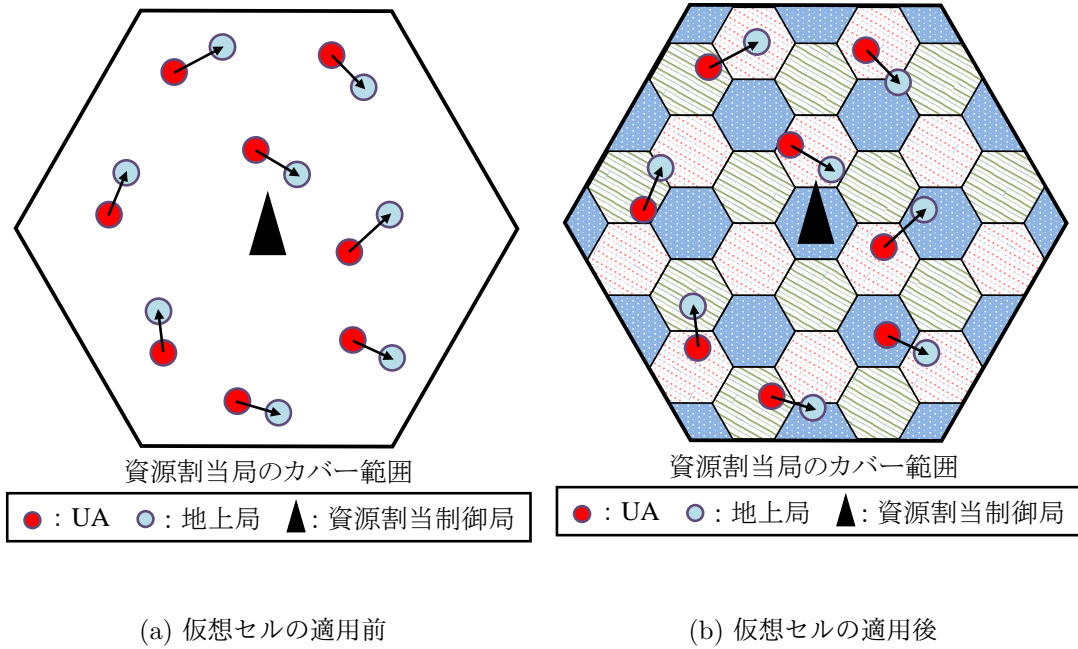


図 3.2: 提案手法のアプローチ

る．UA と地上局は自身の位置情報を基に属する仮想セルを決定するため，仮想セルの半径や起点となる資源割当制御局の位置を常に知っているものとする．この際，UA とその地上局は必ずしも同一の仮想セルに属する必要はなく，異なる仮想セルに属することも可能である．他方，資源割当制御局においても UAS から位置情報を収集し，全 UA と地上局が属する仮想セルを計算する．

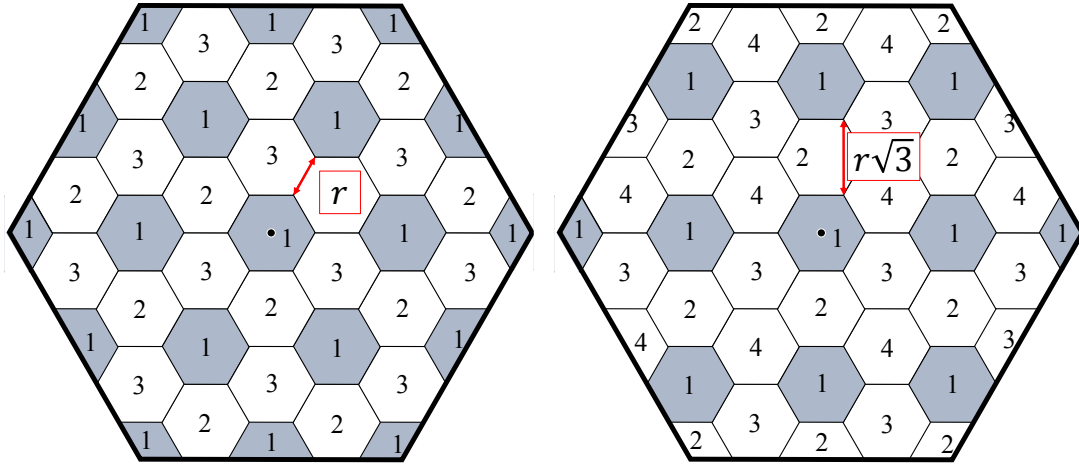
最後に，提案手法では，UA と地上局が属する仮想セルを基に無線資源割当を決定する．1つの周波数チャンネルを共用するため，資源割当制御局は TDMA 方式に基づくタイムスロット割当を UAS に対して行う．ただし，式 3.4 で示されるデータを受信するための SIR の条件を満足する場合は，複数の UAS に対して同一のタイムスロットを割当てる．複数の UAS が同一のタイムスロットを用いて

通信を行うことで、各 UAS が通信で利用可能なタイムスロット数を増加させることができ、スループットが向上する。空間分割法を用いる本提案手法においては、同時通信可能な UA は隣接しない仮想セル内の UA 群を意味する。本研究においては、このような同時通信可能な UA 群が所属する仮想セルの集合を“セルグループ”と定義する。セルグループは幾何学的な配置を取ることによって、同時通信可能な UA 数を増加させることができるため、提案手法ではセルグループの配置は幾何学的均一配置とする。

図 3.3 はセルグループ数が 3, 4, 7 の場合のセルグループの配置例である。図中において、各仮想セルの数字はその仮想セルが所属するセルグループの番号を意味する。つまり、同数字を持つ仮想セル内に存在する UA は同時通信が可能であることを意味する。セルグループ数が 3, 4, 7 の場合を比較すると、同時通信可能な仮想セル数がセルグループ数毎に異なることが分かる。また、図中に示されるように、同時通信が可能な仮想セルと仮想セルの間の物理距離はセルグループ数によって変化する。セルグループ数が 3 の場合には同セルグループに属するセル間の距離は  $r$ 、セルグループ数が 4 の場合には  $r\sqrt{3}$ 、セルグループ数が 7 の場合には  $r\sqrt{7}$  となる。また、幾何学的な模様をとる事が可能なセルグループ数は以下の式を満足する整数値であり、取りうる値は 3, 4, 7, 12 などがある。

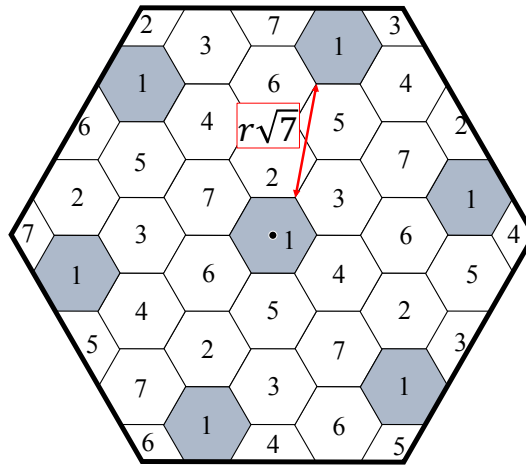
$$\sum_{i,j \in \mathcal{N}, i \neq j} \{ij + i^2 + j^2\} \quad (3.8)$$

ここで、 $\mathcal{N}$  は自然数の集合である。



(a) セルグループ数 3 の場合

(b) セルグループ数 4 の場合



(c) セルグループ数 7 の場合

図 3.3: セルグループ数と干渉セル間距離

### 3.3.2 同時通信を実現するためのタイムスロット割当規則

前述したとおり，同セルグループに属する仮想セル内の UA 同士は，同一のタイムスロットを使用し通信を行うことで，スループットの向上が可能である．し

かし、同セルグループに属している場合においても、同仮想セルに位置する場合には、同時通信を行ったときに SIR の条件を満足することができない。同時通信を行う 2 つの UAS の位置関係によっては、同時通信が可能となるが、SIR が  $\gamma_0$  以上となることを常に保証することは不可能である。本研究では、全 UAS に対して常にデータ受信が可能な資源共用を実現することを目的としているため、これら UAS の同時通信はこの目的に反する。そのため、同一仮想セル内の複数の UAS は同時通信を行わない。同様に、異なるセルグループに属する UA は同時通信することはできない。よって、データ受信を保証するための SIR 条件を満足するためには、タイムスロット割当において以下の 2 つの割当規則に従うことが必要である。

1. 同一のセルに属する UA は同時通信不可能であり、異なるタイムスロットを用いて通信する。
2. 異なるセルグループに属する UA は同時通信不可能であり、異なるタイムスロットを用いて通信する。

両割当規則は、UA が所属する位置を基にしたタイムスロット割当の規則であり、地上局の位置には依存しない。

図 3.4 を例として、タイムスロット割当規則の適用について述べる。図 3.4 において、タイムスロット割当規則 1 より、UA1 及び UA2 は同時通信不可能である。これは、これら UA が同時に通信した場合には、地上局 1 及び地上局 2 が自身の UA からのデータを常に正しく保証することが不可能なためである。同様に、規則 2 より、UA3, UA4, UA5 は同時通信不可能である。他方、UA5 と UA6 は同セルグループの異なるセルに属するため、同一タイムスロットを用いた同時通信が可能である。

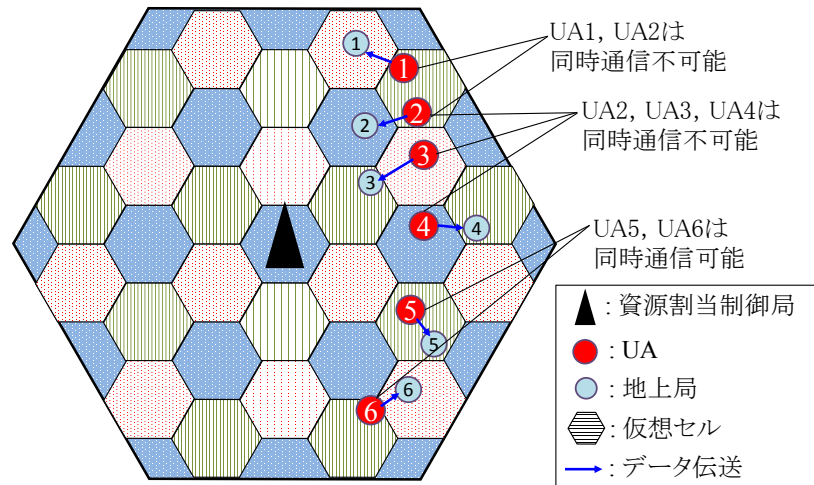


図 3.4: タイムスロット割当規則の適用例

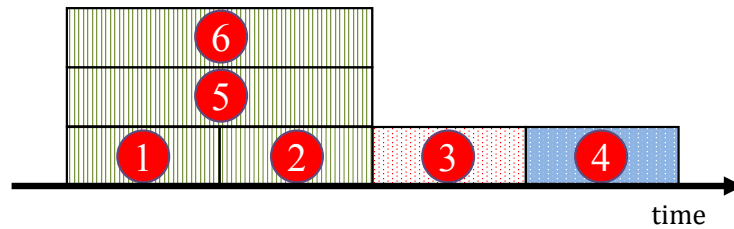


図 3.5: 空間多重を考慮したタイムスロット割当て例

上記条件を考慮した、タイムスロットの割当て例を図 3.5 に示す。タイムスロット割当規則より、UA6 と UA5 そして UA1 に対しては同一のタイムスロットを割り当てることが可能である。また、UA2 に関しても、UA5 と UA6 と空間多重による通信が可能であるため、これらの UAS には同一のタイムスロットが割り当てられる。このように、複数の UA がタイムスロットを空間的に再利用することで、スループットの向上が可能である。他方、UA1, UA2, UA3 そして UA4 は、



タイムスロット割当規則より，同時通信を行うことができないと判断されたため，異なるタイムスロットを用いて通信を行う．各 UAS に割り当てるタイムスロットの総数に関する計算方法は次節において述べる．

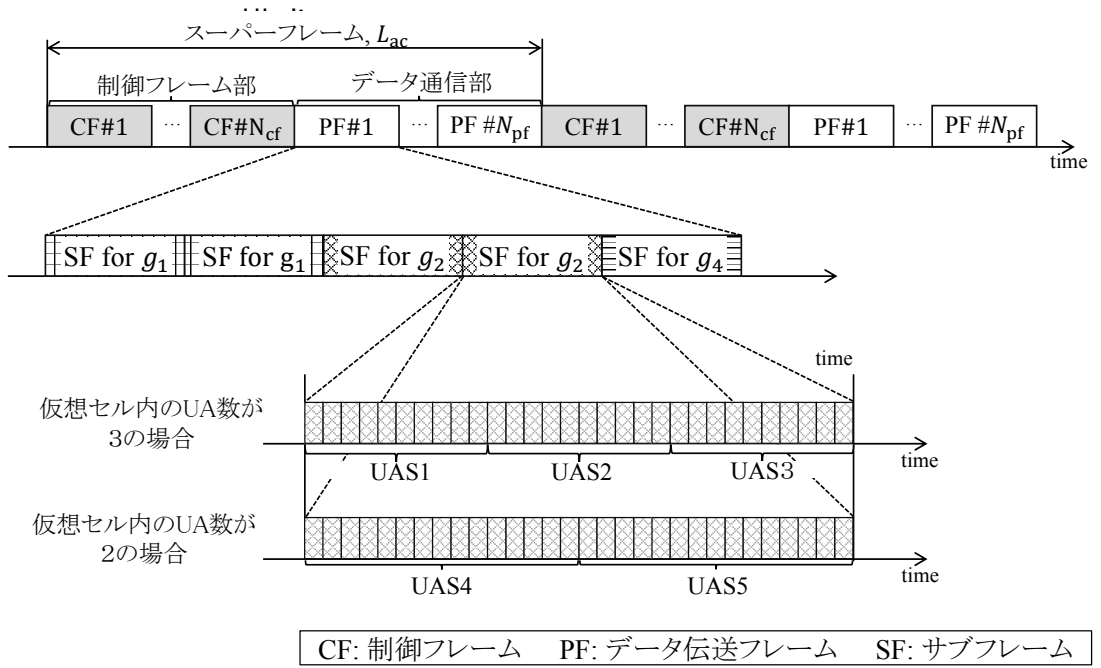


図 3.6: タイムスロットの空間的再利用を実現するためのフレーム構成

UAS と資源割当制御局間での制御情報の交換や，UAS 内での映像データの伝送は全て 1 つの周波数チャネル上で実現される．そのため，資源割当制御局は TDMA 方式によるタイムスロットの割当てを行う．本研究では，UAS と資源割当制御局間での制御データの交換を行うために割当てられた通信フレームを制御フレームと定義する．制御フレーム内の通信は，UAS と資源割当制御局の多対 1 通信であり，空間多重による通信を行うことはできないため，通信は常に成功す

る。他方，UA-地上局間でのデータ伝送を行うために割当てられた通信フレームをデータ伝送フレームと定義する。1つのデータ伝送フレームでは，各UAが1回通信を行う。本提案手法で用いるタイムスロット及びフレーム構成を図3.6に示す。図3.6に示すように，提案手法では，制御フレームとデータ伝送フレームが繰り返されるフレーム構成を用いる。1つのスーパーフレーム内で複数のデータ伝送フレームを繰り返されることで，各UAは短い間隔で送信権を獲得することが可能となる。このような頻度の高い頻度で送信が可能な通信では，リアルタイムの映像伝送において映像をバッファする時間を短くすることができるといった利点がある。また，制御フレームとデータ伝送フレームが繰り返されることで，UASの位置情報などに変化が生じた場合においても，資源割当制御局がUASから情報を収集し，タイムスロット割当を更新することが可能となる。本研究では，複数の制御フレームと複数データ伝送フレームを1つのブロックとし，このブロックをスーパーフレームと定義する。つまり，スーパーフレーム長  $L_{ac}$  は，1スーパーフレーム中の制御フレーム数  $N_{cf}$  とデータ伝送フレーム数  $N_{pf}$ ，フレーム長  $L_f$  より，以下の式で表される。

$$N_{pf} \cdot L_f + N_{cf} \cdot L_f = L_{ac}. \quad (3.9)$$

各スーパーフレーム中の制御フレーム内で送信する情報は，UASの位置情報や資源割当情報など，常に固定サイズであると考えられるため， $N_{cf} \cdot L_f$  は固定値とする。

異なる仮想セルグループに所属するセル内のUAは同時通信を行うことができないため，異なるタイムスロットを用いて通信を行う。そのため，データ伝送フレームは仮想セルグループ数  $N_{cg}$  に分割され，それぞれのセルグループに割当てられる。仮想セルグループ数分に分割されたデータ伝送フレームをサブフレー

ムと定義する．セルグループ  $g$  に割当られたサブフレーム長を  $L_{sf,g}$  としたとき，データ伝送フレームとサブフレームは以下の関係が成り立つ．

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} L_{sf,g} = L_f \quad (3.10)$$

$\mathcal{G}$  は全セルグループの集合である．

このことから，スーパーフレーム長  $L_{ac}$  は，サブフレームと制御フレームより以下の等式により表すことができる．

$$N_{pf} \cdot (\sum_{g \in \mathcal{G}} L_{sf,g}) + N_{cf} \cdot L_f = L_{ac}. \quad (3.11)$$

任意のセルグループ  $g$  に属する仮想セル  $c$  内に存在する UA 数が1の場合，そのセルグループに対して割当られたサブフレーム長  $L_{sf,g}$  の全ての時間で通信することが可能である．しかしながら，同仮想セルグループ内に複数の UA が存在する場合には，これら UA は同時通信を行うことができないため，サブフレームを分割し利用する必要がある．そこで，本提案手法ではサブフレームをタイムスロットに分割し，それぞれの UA に割り当てる．本研究においては，同仮想セルに位置する UA には同量のスロット数が割り当てられるものとする．そのため，セル  $c$  に位置する UA が利用可能なタイムスロット数は以下の式によって表される．

$$N_{ts,c} = \frac{L_{sf,g}}{V_c} \quad (3.12)$$

$V_c$  は仮想セル  $c$  内に位置する UA 数である．本来タイムスロット数は整数値を取るが，本研究においてはタイムスロット長がサブフレーム長よりも十分に短い環境を想定するため，実数値として扱う．図 3.6 は，セルグループ  $g_2$  に属するセル  $c$  内に UA が2台存在する場合と3台存在する場合のタイムスロットの割当例である．セル内に存在する UA 数が2の場合は，UA 数3の場合と比べて，各 UA が

多くの通信時間を確保することができる。そのため、UA 数が少ない仮想セルほどスループットが大きくなる。

### 3.3.4 割当タイムスロットの決定手順

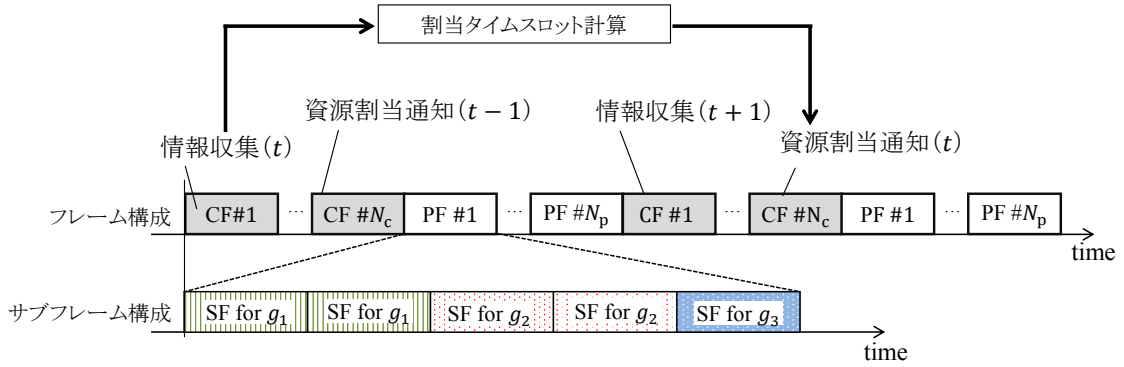


図 3.7: 資源割当制御局によるタイムスロット割当て

次に、資源割当制御局によるタイムスロット割当の動作について述べる。割当タイムスロットを決定するために必要な入力パラメータや割当タイムスロット決定手法については、次節以降で詳述する。

各スーパーフレーム内では全 UAS から取得した情報を基に資源割当制御局がタイムスロット割当の計算を行う。割当結果は制御フレーム内で、資源割当制御局から全 UA と地上局へ通知される。同スーパーフレームのデータ伝送フレームでは、通知された割当結果に基づき、各 UAS が割当タイムスロットを使用して通信を行う。

しかしながら、タイムスロット割当に必要な情報の収集と割当結果通知を、同

スーパーフレーム内で行うことは計算時間の点で現実的ではない。そこで、本研究では、割当結果の通知及び適用は、UAS から情報を収集したスーパーフレームの次のスーパーフレーム内で行うものとする。図 3.7 に、本提案手法におけるタイムスロット割当の更新手順を示す。資源割当制御局は時刻  $t$  におけるスーパーフレームの制御フレーム内で、タイムスロット割当の計算に必要な情報を全 UAS から収集する。収集した情報を基にタイムスロット割当を計算し、その計算結果は時刻  $t+1$  におけるスーパーフレームの制御フレーム内で全 UAS に対して通知される。全 UAS は時刻  $t+1$  内のデータ伝送フレームからその割当結果に基づくタイムスロットを使用して通信を行う。

### 3.4 モビリティを考慮したパラメータ決定手法

全 UAS のデータ受信を保証しながら、ネットワーク内の最低スループットを最大化するためには仮想セルに関するパラメータを適切に決定する必要がある。本節においては、UAS の飛行軌道を考慮したパラメータ決定の必要性とパラメータ決定方法について述べる。本提案手法で使用するパラメータの内、仮想セルに関連するパラメータを表 3.1, UAS に関連するパラメータを表 3.2 に示す。

#### 3.4.1 パラメータ決定の概要

資源割当制御局のカバー範囲全域に対して仮想セルの適用を行うためには、仮想セル半径  $r$  を決定する必要がある。前節において述べたように、セル半径  $r$  は同セルグループに属するセル間の距離に影響を与える。同セルグループに属するセル間の距離は、同時通信する UA 間の干渉波距離を決定するパラメータであるため、SIR における干渉波電力がセル半径  $r$  によって変化する。そこで本研究では、これらの影響に基づく仮想セルの半径決定手法について述べる。更に、UA のモビリティと仮想セル半径の関係について定式化し、仮想セル半径の決定を行う。

次に、スーパーフレーム長の決定手法について述べる。スーパーフレーム長の決定においても、UA のモビリティとの関係について定式化を行う。また、スーパーフレーム長と合計スループットの関係について指摘し、これらの関係から最適なスーパーフレーム長を決定する手法を提案する。

仮想セル半径及びスーパーフレーム長の決定後、提案手法ではそれぞれの UAS に割り当てるタイムスロットを決定する。割当タイムスロットの決定では、まず、各仮想セル内の UAS が達成可能なスループットの定式化を行う。その後、UA 配

表 3.1: 仮想セルに関するパラメータ定義

Notation	Description
$L_{ac}$	スーパーフレーム長
$L_f$	制御用フレーム長及びデータフレーム長
$L_{sf,g}$	セルグループ ( $g$ ) に対する割当サブフレーム長
$N_{cf}$	スーパーフレーム内の制御用フレーム数
$N_{pf}$	スーパーフレーム内のデータフレーム数
$d_u$	$UAS(u)$ における UA-地上局間距離
$\mathcal{C}$	全仮想セルの集合
$\mathcal{C}_g$	セルグループ ( $g$ ) に所属する仮想セルの集合
$\mathcal{G}$	全セルグループの集合
$V_c$	仮想セル ( $c$ ) 内に存在する UA の総 UA 数
$\beta$	同セルグループに属するセル間距離のパラメータ
$\gamma_0$	データ受信を保証する SIR(Signal-to-Interference) 閾値
$N_{cg}$	セルグループ数
$A_{ras}$	資源割当制御局のカバー面積
$A_r$	仮想セルの面積
$r$	仮想セルの半径
$r_{ras}$	資源割当制御局のカバー半径

置のばらつき, 即ち各仮想セル毎の UA 数に基づきタイムスロットを割当てることの必要性について述べ, 最適なタイムスロット割当の決定方法について提案する.

以上の 3 つのパラメータ決定により, 全 UAS に対してデータ受信環境を保証しつつ, ネットワーク内の最低スループットを最大化する資源割当手法を実現す

表 3.2: UAS に関するパラメータ定義

Notation	Description
$B$	周波数帯域幅
$P_t$	出力電力
$G_t$	送信アンテナ利得
$G_r$	受信アンテナ利得
$N_0$	雑音電力
$\mathcal{U}$	全 UAS の集合
$v$	UAS の最大飛行速度

る．以降の小節では，仮想セル半径の決定手法，スーパーフレームの決定手法，最適なタイムスロット割当の決定手法について提案と定式化を行う．

### 3.4.2 仮想セル半径の決定

STDMA(Spatial TDMA) に代表される空間的なタイムスロットの再利用を考慮した既存の資源割当手法は，全送受信ノードの位置情報から SIR を算出することで同時通信が可能な通信ペアの決定を行う．しかしながら，位置情報を基に同時通信が可能な UAS を決定するため，ノードの移動によって通信距離や SIR が変化する．SIR が低下し閾値  $\beta$  以下となった場合には，データ受信が失敗する．そのため，UA のような通信機器が高いモビリティを持つ環境においては適用が困難である．そこで本研究では UA のモビリティを考慮した，仮想セル半径の決定を行うことで UA のモビリティによって生じる空間多重通信の課題を解決する．

前述したように，仮想セルを基にした資源割当では，仮想セルの半径  $r$  によっ



て同セルグループに属するセルとの距離が決定する．同セルグループに属するセル内の UA は同一タイムスロットを用いて通信を行うため，セル半径  $r$  は干渉を与える UA との距離や干渉波電力の値に影響を与える．そこで，UAS の移動や UA-地上局間距離を考慮して仮想セル半径  $r$  を決定することで，全 UAS の SIR が  $\gamma_0$  以上となる仮想セル半径の決定手法を提案する．

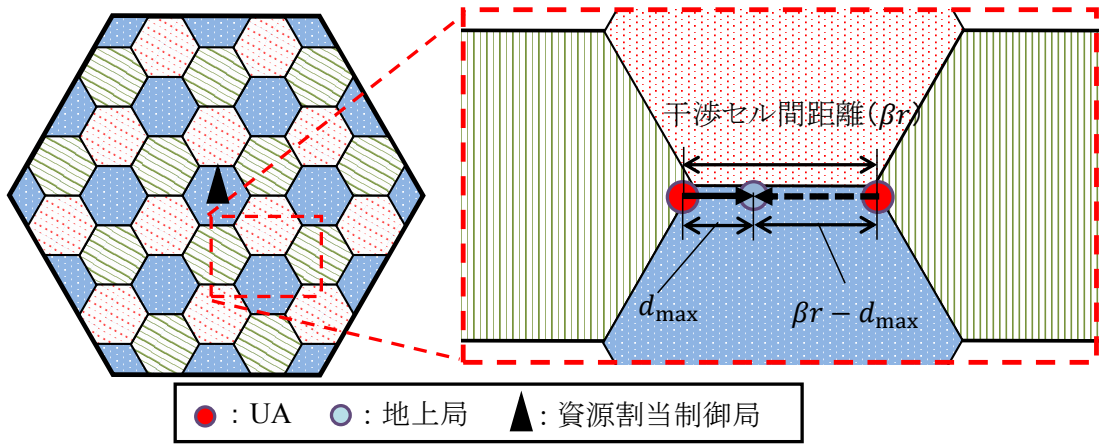


図 3.8: UA の静止環境において SIR が最小となる条件

まず，UA の静止環境における仮想セルの半径決定方法について述べる．全 UAS の SIR が条件式 (3.4) を満足するためには，ネットワーク内の全 UAS の内，SIR が最小となる環境下においても条件式 (3.4) を満足することが必要となる．SIR は希望波電力と干渉波電力の比であることから，SIR が最小となる環境は，希望波電力が最小，且つ干渉波電力が最大となる環境下であることが分かる．受信電波強度に関する式 (3.1) より，UA-地上局間距離  $d_u$  が最も大きい UAS の希望波電力が最小であることが分かる．つまり，全 UAS のうち，UA-地上局間距離の最も長い UAS で希望波の受信電力が最小となる．他方，干渉波電力が最大となる条件

は、地上局と干渉を与える UA が最も近い場合である。本提案手法における、六角形の仮想セルに分割されたネットワーク構造においては、干渉を与える UA がセル端で通信を行っているときに干渉量が最大となる。以上の、希望波電力最小になる条件と干渉波電力が最大になる条件を組み合わせると、SIR が最小となる UAS の配置は図 3.8 に示されるものとなる。UA と地上局、干渉を与える UA は直線状に並び、希望波の伝搬距離を  $d_{\max}$  としたとき、干渉波の伝搬距離は以下の式によって表される。

$$\beta r - d_{\max} \quad (3.13)$$

ここで、 $\beta$  は同セルグループに属するセル間距離に関するパラメータであり、セルグループ数が3の場合は  $\beta = 1$ 、4の場合は  $\beta = \sqrt{3}$ 、セルグループ数が7の場合は  $\sqrt{7}$  となる。また、 $d_{\max}$  は全 UAS の内、最も UA-地上局間距離  $d_u$  の大きい値であり以下の式より求めることができる。

$$d_{\max} = \max_{u \in \mathcal{U}} d_u, \quad (3.14)$$

このことから、SIR の最小値においても閾値を満足する不等式は以下のとおりに表示される。

$$\frac{P_{d_{\max}}}{P_{\beta r - d_{\max}}} \geq \gamma_0 \quad (3.15)$$

式 (3.1), (3.15) の不等式を解くことにより、SIR が最低となる環境においても SIR が  $\gamma_0$  以上となる仮想セル半径の条件は以下の式で導出される。

$$\beta r \geq d_{\max} + d_{\max} \sqrt{\gamma_0}. \quad (3.16)$$

よって、上式を満足することで本提案手法では UA の静止環境において常に全 UAS のデータ受信を保証可能となる。



の移動時間は、位置情報を送信してから次のスーパーフレームでデータ伝送を完了するまでの最大値であり、その最大値は以下の式によって表される。

$$2 \cdot L_{ac} \quad (3.17)$$

つまり、資源割当制御局は各 UA が2 スーパーフレーム分移動することを考慮した仮想セルの半径が必要であることを意味する。ネットワーク内の全 UAS の最大移動速度を  $v$  としたとき、UA の最大移動量は以下の式によって表される。

$$2 \cdot v \cdot L_{ac} \quad (3.18)$$

そのため、 $2 \cdot L_{ac}$  秒後の UA-地上局間の最大通信距離は以下の通りに表される。

$$d_{\max} + 2 \cdot v \cdot L_{ac}. \quad (3.19)$$

式 (3.4) より、UA の移動環境において、全 UAS の SIR が  $\gamma_0$  以上となる仮想セル半径は以下の通りに導出される。

$$\beta r = (d_{\max} + 2vL_{ac}) (1 + \sqrt{\gamma_0}). \quad (3.20)$$

つまり、本研究における仮想セル半径の決定では、現在の全 UAS の最大通信距離  $d_{\max}$  と移動速度  $v$ 、スーパーフレーム長  $L_{ac}$  によって一意に決定される。以上の仮想セル半径に関する条件を満足することで、本手法では、UA の移動環境においても常に全 UAS へのデータ受信環境が可能となる。

### 3.4.3 スーパーフレーム長の決定

次に、スーパーフレーム長の決定方法について述べる。仮想セル半径の条件式 (3.20) に示されるように、スーパーフレームの長さ  $L_{ac}$  によって仮想セルの半径が

変化する．スーパーフレーム長が大きい場合には，スーパーフレーム内での UA の移動量が大きくなるため，仮想セル半径が大きくなる．他方，スーパーフレーム長が小さい場合には，UA の移動量は小さく，仮想セルの半径を小さく設定することができる．また，仮想セルの半径は，資源割当制御局のカバー範囲に敷き詰めることが出来る仮想セル数に影響を与える．仮想セルの面積  $A_{vc}$  は仮想セル半径  $r$  より，以下の通りに求めることができる．

$$A_{vc} = \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 \quad (3.21)$$

よって，資源割当更新間隔の面積を  $A_{ras}$  としたとき，資源割当制御局のカバー範囲内に敷設可能な仮想セル数  $N_{vc}$  は以下の式によって表される．

$$N_{vc} = \frac{A_{ras}\beta^2}{A_{vc}} \quad (3.22)$$

$$= \frac{2A_{ras}\beta^2}{3\sqrt{3}} \quad (3.23)$$

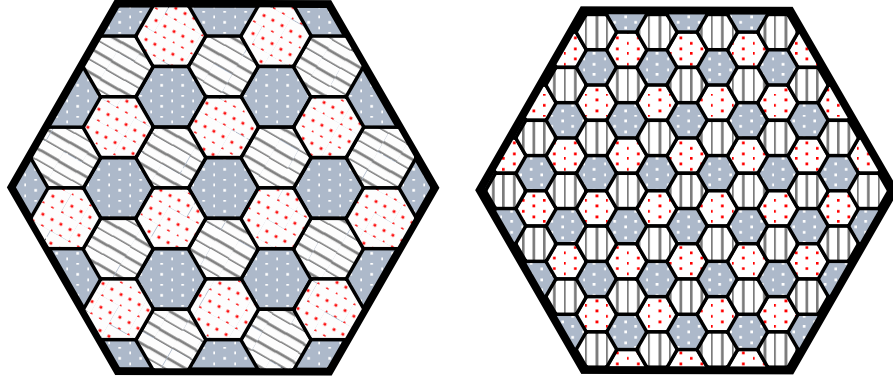
$$= \frac{2A_{ras}\beta^2}{3\sqrt{3}(d_{\max} + 2vL_{ac})^2(1 + \sqrt{\gamma_0})^2}, \quad (3.24)$$

本来，仮想セル数  $N_{vc}$  は整数値をとるが，本研究においては，ネットワーク端の影響による性能変化等の影響を除外し提案手法の性能評価を行うために，仮想セル数を実数値として扱う．

図 3.10 にスーパーフレーム長が仮想セル半径及び仮想セル数に与える影響を示す．資源割当制御局のカバー範囲内の仮想セル数  $N_{vc}$  が増加すると，同時通信可能な UA 数が増加する．全セルに最低 1 台の UA が存在する場合に，同時通信を行う UA 数  $N_s$  は以下のように導出される．

$$N_s = \frac{N_{vc}}{N_{cg}} \quad (3.25)$$

$N_{cg}$  はセルグループ数である．



(a) スーパーフレームが長い場合 (仮想セル数：少)

(b) スーパーフレームが短い場合 (仮想セル数：多)

図 3.10: スーパーフレーム長がセル半径に与える影響

仮想セル数の大小をネットワークにおける指標において評価するために、周波数利用効率を導入する．一般的に、周波数利用効率は単位帯域幅当たりのスループット ([bps/Hz]) として定義される．本研究においては、帯域幅は固定であるから、周波数利用効率を資源割当制御局カバー範囲内の全 UAS の総スループットとして定義することができる．仮想セル内で最低 1 台の UA が通信を行っている場合の全 UAS の総スループットは以下の通りに導出できる．

$$\theta_{\text{sum}} = B \cdot \log_2(1 + \gamma_0) \cdot \frac{N_{\text{vc}}}{N_{\text{cg}}}, \quad (3.26)$$

以上の導出より、スーパーフレーム長  $L_{\text{ac}}$  によって周波数利用効率が変化することが確認できる．スーパーフレーム長  $L_{\text{ac}}$  が小さいほど周波数利用効率が向上し、 $L_{\text{ac}}$  が大きいほど周波数利用効率が低下する．

他方、スーパーフレーム長  $L_{\text{ac}}$  は、データ伝送用フレーム長  $N_{\text{pf}} \cdot L_{\text{f}}$  にも影響を与える．

前節で述べた通り，制御フレーム内では UAS から地上局への位置情報の伝送や，資源割当制御局から UAS に対する割当情報の通知を行うため，各スーパーフレーム中の制御フレーム部は固定値である．そのため，スーパーフレーム長が変化することで，データ伝送用フレームの長さが変化する．スーパーフレーム中のデータ伝送用フレームが占める割当を実効フレーム率  $\alpha$  と定義すると，実効フレーム率  $\alpha$  は以下の式によって表される．

$$\alpha = \frac{L_f N_{pf}}{L_{ac}} \quad (3.27)$$

$$= 1 - \frac{L_f \cdot N_{cf}}{L_{ac}} \quad (3.28)$$

図 3.11 に，スーパーフレーム長がフレーム実効率  $\alpha$  に与える影響を示す．



(a) スーパーフレームが長い場合 ( $\alpha$ :大)



(b) スーパーフレームが短い場合 ( $\alpha$ :小)

図 3.11: スーパーフレーム長がフレーム実効率  $\alpha$  に与える影響

以上のスーパーフレーム長に関する定式化について整理する．スーパーフレーム長  $L_{ac}$  が短くなると，総スループット  $\theta_{\text{sum}}$  は大きくなるが，フレーム実効率  $\alpha$  は低下する．他方，スーパーフレーム長  $L_{ac}$  が長くなると，総スループット  $\theta_{\text{sum}}$  は小さくなるが，フレーム実効率  $\alpha$  は向上する．つまり，総スループットとフレーム実効率の間にはトレードオフの関係があり，スーパーフレーム長によって変化する．

本研究では，これらトレードオフの関係より，スーパーフレーム長  $L_{ac}$  の最適化を行う．最適化を行うに当たり，全 UAS のデータ伝送中の合計スループット  $\theta_p$  を指標として導入する．スーパーフレーム中のデータ伝送フレーム中のスループット  $\theta_p$  は，式 (3.26)，式 (3.27) より以下のとおりに表される．

$$\theta_p = \theta_{\text{sum}} \cdot \alpha \quad (3.29)$$

$$= B \log_2(1 + \gamma_0) \cdot \frac{(L_{ac} - L_f N_{cf})}{L_{ac}} \quad (3.30)$$

$$\cdot \frac{2A_{\text{ras}}\beta^2}{3N_{\text{cg}}\sqrt{3}(d_{\text{max}} + 2vL_{ac})^2(1 + \sqrt{\gamma_0})^2} \quad (3.31)$$

$\theta_p$  が最大となる  $L_{ac}$  を導出するために， $\theta_p$  を  $L_{ac}$  について偏微分する．

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_p}{\partial L_{ac}} &= B \log_2(1 + \gamma_0) \cdot \frac{2A_{\text{ras}}\beta^2}{3N_{\text{cg}}(1 + \sqrt{\gamma_0})^2\sqrt{3}} \\ &\quad \cdot \frac{-2v^2L_{ac}^2 + 3vL_fN_cL_{ac} + d_{\text{max}}L_fN_c}{(d_{\text{max}} + vL_{ac})^2L_{ac}} \end{aligned} \quad (3.32)$$

上式を  $L_{ac} \geq 0$  の範囲で極大点を導出すると，最適なスーパーフレーム長は以下の式によって表される．

$$L_{ac}^{\text{opt}} = \frac{6vL_fN_{cf} + \sqrt{4vL_fN_{cf}(9vL_fN_{cf} + 4d_{\text{max}})}}{8v}. \quad (3.33)$$

上式より，最適なスーパーフレーム長  $L_{ac}^{\text{opt}}$  は UA の飛行速度  $v$  や UA-地上局間の通信距離  $d_{\text{max}}$  によって決定するパラメータであることが分かる．以上のスー



サブフレーム長の最適化により，本研究では全 UAS のペイロード部のスループットの合計値を実現する．

#### 3.4.4 タイムスロット割当の最適化

本提案手法では，全仮想セル内の UA 数を基にタイムスロット割当を決定する．本タイムスロット割当の目的は，ネットワーク内の最低スループットを最大化することである．

前節で述べたとおり，同じセルグループ  $g$  に属する仮想セル内の UA は同一タイムスロットを用いて通信することで，同時通信を行う．つまり，セルグループ  $g$  に属する仮想セル  $c$  が利用可能な通信時間は  $L_{sf,g}$  である．また，仮想セル内に複数の UA が位置している場合にそれぞれの UA に割当てられるタイムスロット数は式 3.12 に従う．そのため，セル  $c$  内に  $V_c$  台の UA が存在する場合に，それぞれの UA の通信スループットは以下の式により表される．

$$\theta_c = B \cdot \log_2(1 + \gamma_0) \cdot \frac{N_{pf} \cdot L_{sf,g}}{V_c \cdot L_{ac}}. \quad (3.34)$$

上式からも分かるように，仮想セルを用いた資源割当手法では，セルグループに対しての割当サブフレーム長  $L_{sf,g}$  とセル内の UA 数が与えられると，各 UA への割当タイムスロット数は一意に決定可能である．つまり，仮想セルを基にした割当タイムスロットの決定は，それぞれのセルグループ  $g$  に割当てるサブフレーム長  $L_{sf,g}$  を決定すること等価である．

既存研究では，各 UAS が達成可能なスループットについては考慮されておらず，通信ノードのばらつきがある場合にはスループットにもばらつきが生じることが課題となっていた．本提案手法においては，各セル内の UA 数によってスループット

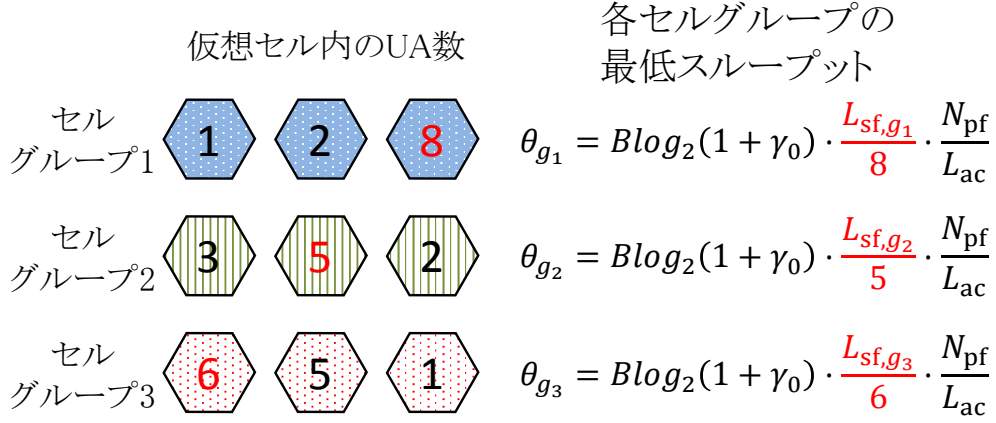


図 3.12: 割当サブフレーム長とスループット

プットが変化するため、これを考慮して割当サブフレーム長の決定を行う。サブフレーム長決定の目的は以下の式によって表される。

$$L_{sf,g}^{\text{opt}} = \arg \max_{L_{sf,g}} (\min \{\theta_c | c \in \mathcal{C}\}) \quad (3.35)$$

$$= \arg \max_{L_{sf,g}} \left( \min \left( B \cdot \log_2(1 + \gamma_0) \cdot \frac{N_{pf} \cdot L_{sf,g}}{V_c \cdot L_{ac}} \right) \right) \quad (3.36)$$

$L_{sf,g}^{\text{opt}}$  はセルグループ  $g$  に対する最適なサブフレーム長である。

次に、各仮想セルグループにおいて、スループットが最低となる仮想セルについて考える。各セルグループにおいて、 $\theta_c$  が最小となる仮想セルは、上式より UA 数の最も多いセルであることがわかる。そのため、目的関数は以下のように変形できる。

$$L_{sf,g}^{\text{opt}} = \arg \max_{L_{sf,g}} \left( B \log_2(1 + \gamma_0) \frac{N_{pf} L_{sf,g}}{\max_{c \in \mathcal{C}_g} V_c} \cdot \frac{1}{L_{ac}} \right) \quad (3.37)$$

つまり、各セルグループにおいて最も UA 数の多いセル内の UA がネットワーク内の最小スループットの候補となる。

図 3.12 に，UA 数と各セルグループの最小スループットの例を示す．セルグループ 1 では UA 数 8 のセル内の UA が最低スループットとなる．同様にセルグループ 2 では UA 数 5 の仮想セルが，セルグループ 3 では UA 数 6 のセルが最小スループットとなり，それぞれのスループットは図に示される通りとなる．セルグループ数が 3 の場合は，これら 3 つのセルグループの最小スループットを最大化することが目的となる．各セルグループにおける最小スループットが全て等しくなる時に最小スループットが最大となるため，任意のセルグループ  $g$  に対する最適なサブフレーム長  $L_{sf,g}^{\text{opt}}$  は以下の式によって表される．

$$L_{sf,g}^{\text{opt}} = \frac{\max_{c \in \mathcal{C}_g} V_c}{\sum_{g' \in \mathcal{G}} \left( \max_{c \in \mathcal{C}_{g'}} V_c \right)}, \quad (3.38)$$

以上のサブフレーム長  $L_{sf,g}$  の決定，即ち UAS に対する割当タイムスロット数の決定により，提案手法ではネットワーク内の最低スループットを最大化する．

表 3.3: シミュレーションにおけるパラメータ設定 1

Parameter	value
UAS 数	100-500
資源割当制御局のカバー範囲半径	5000 m
周波数帯域	5.7 GHz
周波数チャネル数	1
帯域幅 $B$	20 MHz
送信電力 $P_t$	0.2 W
雑音電力 $N_0$	$1.0 \times 10^{-12}$ W
送信アンテナ利得 $G_t$	0 dBi
受信アンテナ利得 $G_r$	0 dBi
セルグループ数 $N_{cg}$	3, 4, 7
電波伝搬モデル	自由空間モデル

### 3.5 評価及び解析

以下では、MATLAB を用いたシミュレーションにより提案手法の有効性を評価する。初めに、従来手法との比較により提案手法の有効性について検討する。次に、前節で提案を行ったスーパーフレーム長の最適化手法の有効性を確認する。そして、UA の分布にばらつきが存在する環境下において提案手法の性能について数学的解析を行う。

### 3.5.1 実験環境

本シミュレーションでは、多数の UAS が近傍空域内に展開され、UA が自身の地上局に対してデータ伝送を行う環境を想定する。表 3.3 にシミュレーションパラメータを示す。資源割当制御局はフィールド中心に 1 台敷設されており、各 UA は資源割当制御局から割当てられたタイムスロットを使用して通信するものとする。資源割当制御局のカバー範囲は 5000m と設定する。また、全ての UAS で同じ性能の通信機器を持ち、電波伝搬としては自由空間モデルを用いる。各 UAS のリンク容量はシャノンハートレーによって導出される理論限界値に従うものとする。

### 3.5.2 実験 1：空間多重の有効性評価

本シミュレーションでは、空間的なタイムスロットの再利用を行わない TDMA 方式と提案手法を比較することで、提案手法の有効性を確認する。提案手法では、仮想セルを適用してタイムスロット割当を行うが、この際のセル半径、スーパーフレーム長、割当タイムスロットは前節で提案したパラメータ決定手法を用いる。それぞれの手法を用いた時のネットワーク内の最低スループットを測定することによって、資源割当制御局カバー範囲内の周波数利用効率を評価する。また、UA-地上局間の最大通信距離は 400 m とする。

実験 1 の結果を図 3.13 に示す。図 3.13 より、提案手法ではセルグループ数が 3, 4, 7 いずれの場合においても高いスループットとなることが確認できる。これは、提案方式では干渉波電力を考慮した仮想セルを構築することによって、タイムスロットを空間的に再利用するためである。この結果より、多数の UAS が

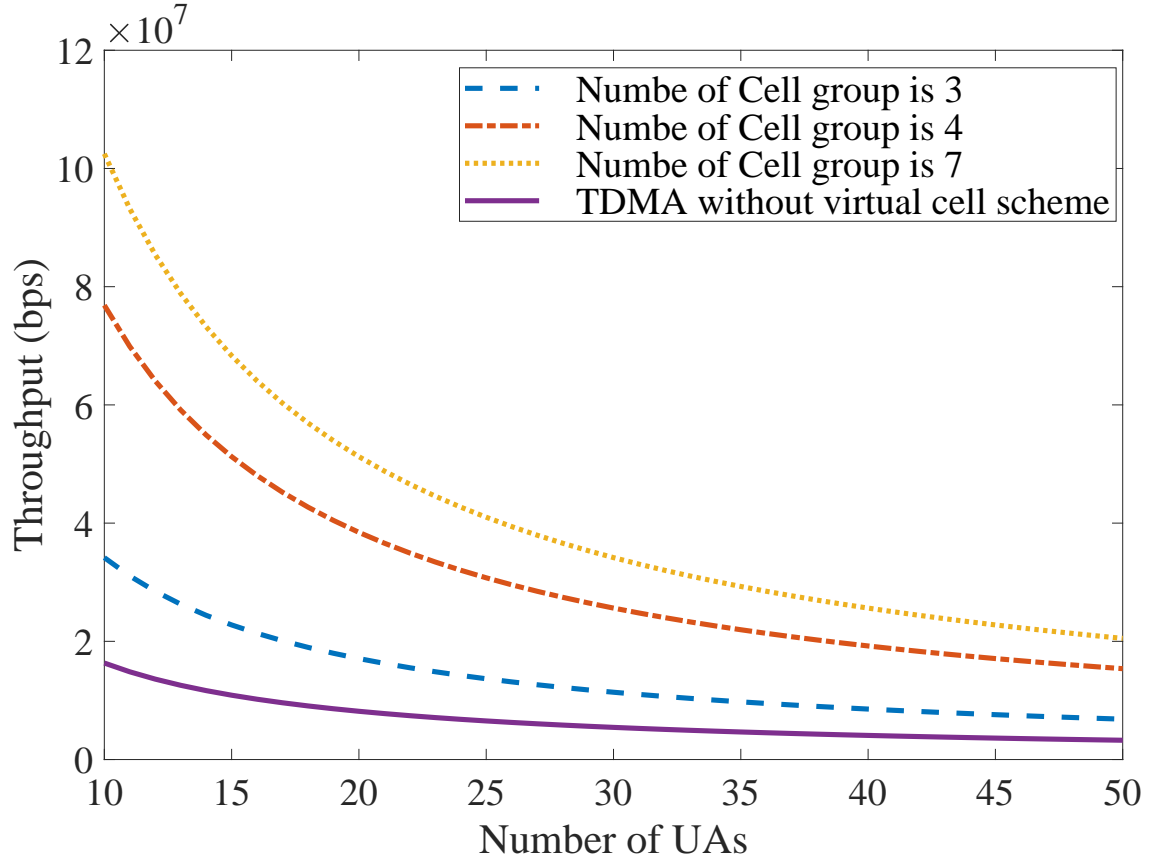


図 3.13: 既存手法との比較による提案手法の有効性評価

展開される環境における，提案方式の有効性を確認した．また，図 3.13 において，セルグループ数  $N_{cg}$  によって合計スループットとが変化する確認できる．これは，セルグループ数  $N_{cg}$  が異なると干渉し合うセル間の距離が変化し，セル半径や敷設可能な仮想セル数が異なるためである．

### 3.5.3 実験 2：スーパーフレーム長決定手法の有効性評価

本シミュレーションでは，前節で提案したスーパーフレーム長の最適化について評価を行う．図 3.14 にスーパーフレーム長を変化させた時の，全 UAS の合計

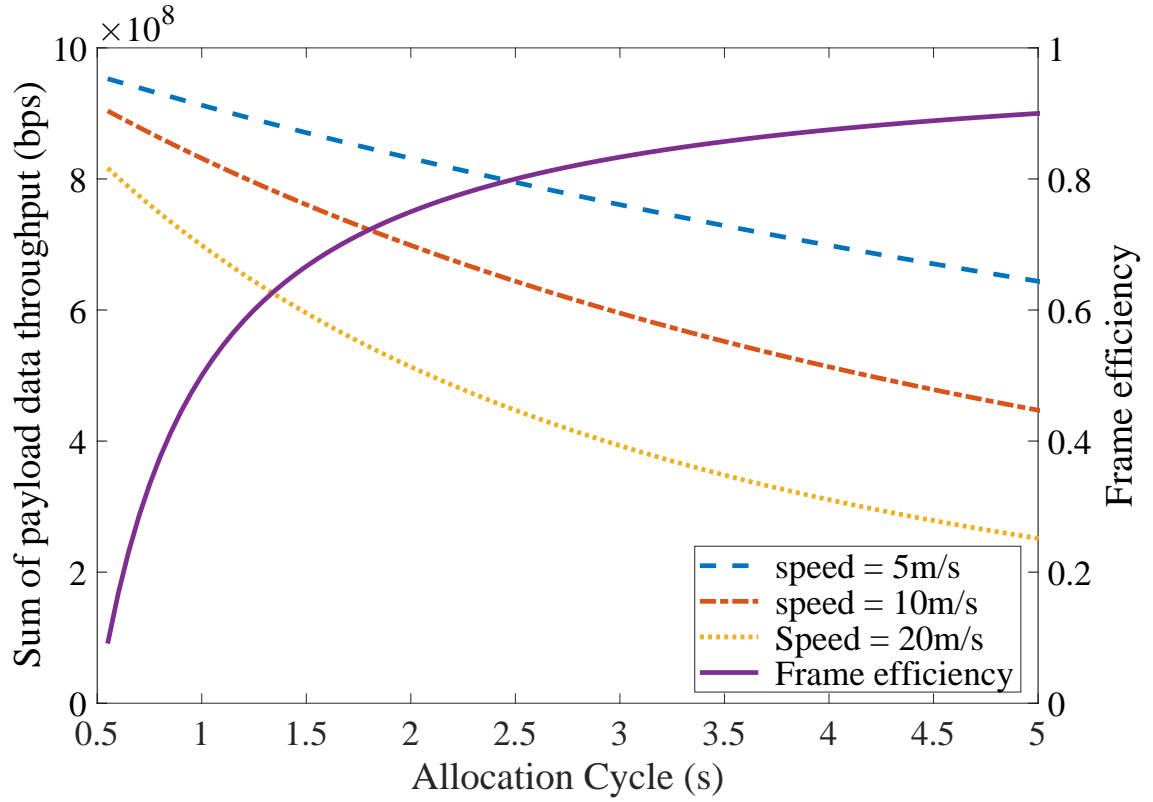


図 3.14: ペイロード部の合計スループット

スループットとフレーム実効率を示す。式 (3.26), (3.27) に示されるように、合計スループットとフレーム実効率はスーパーフレーム長に対してトレードオフの関係であることが確認できる。

図 3.15 にペイロード部の合計スループットの測定結果を示す。図 3.15 において、点は提案手法を用いてスーパーフレーム長決定した時の測定結果である。提案手法によるスーパーフレーム長の決定が最もスループットが高くなることが確認できる。これにより、スーパーフレーム長の決定の有効性を確認した。

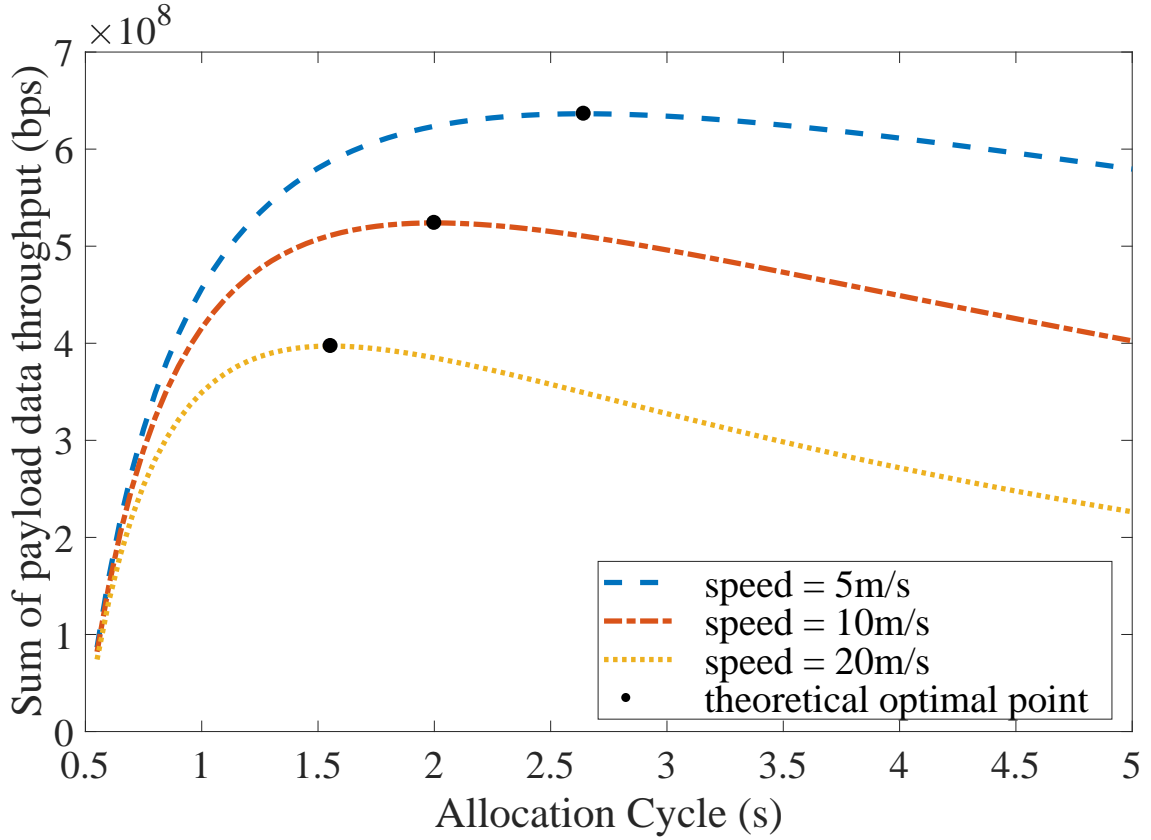


図 3.15: 合計スループットとフレーム実効率

### 3.5.4 UA の地理的配置がスループットへ与える影響

UA の地理的配置が提案手法の性能に与える影響を解析することを目的として、提案手法を用いた場合のスループットの下限值と上限値について解析を行う。最適な割当サブフレーム長  $L_{sf,g}^{\text{opt}}$  に関する定式化より、ネットワーク内の最低スループットは以下の式によって表される。

$$\min \{\theta_c \mid \forall c \in \mathcal{C}\} = \frac{\alpha B \log_2(1 + \gamma_0)}{\sum_{g \in \mathcal{G}} \max \{V_{c'} \mid \forall c' \in \mathcal{C}_g\}}. \quad (3.39)$$

ここで、 $\mathcal{C}_g$  はセルグループ  $g$  に属するセルの集合である。上式を最小化する UAS の配置は、分母を最大化する配置である。つまり、1 つのセル内に全 UAS が存



在する場合に、タイムスロットの再利用を行うことができないため、周波数利用効率が最低となる。このことから、提案手法のスループット下限値は以下の式によって表される。

$$\theta_c^{\text{lower}} = \frac{\alpha}{|\mathcal{U}|} B \log_2(1 + \gamma_0). \quad (3.40)$$

スループットを最大化する UAS の配置は、式 (3.39) の分母を最大化するものである。つまり、全セルに UAS が均一に配置されている UAS 配置となり、提案手法のスループット上限値は以下の式によって表される。

$$\theta_c^{\text{upper}} = \frac{\alpha \cdot N_{\text{vc}}}{N_{\text{cg}} \cdot |\mathcal{U}|} \cdot B \cdot \log_2(1 + \gamma_0). \quad (3.41)$$

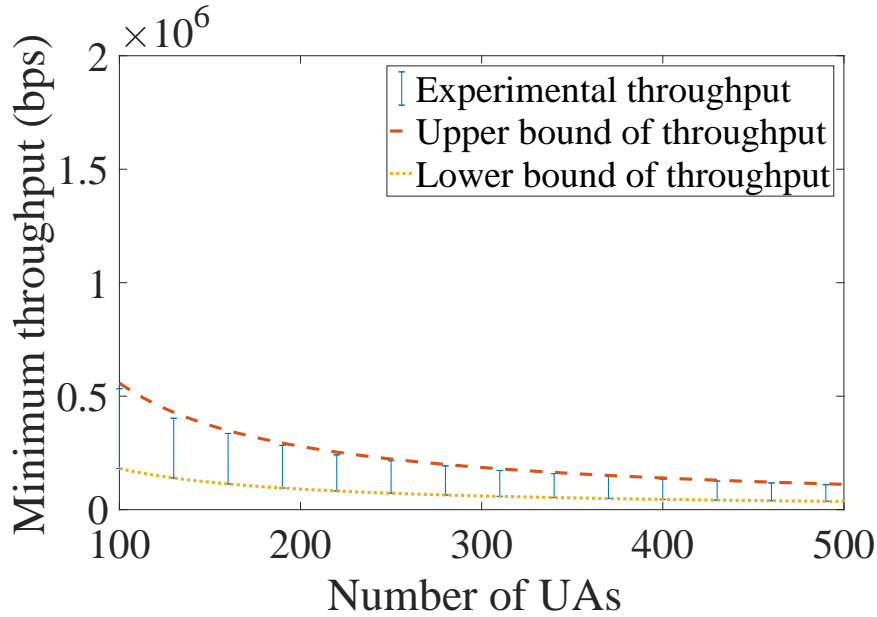


図 3.16: UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が3の場合）

以上の提案手法の下限値と上限値について、実験値と比較することで立式の妥当性を検証する。シミュレーションでは、UAS の配置をランダムに変化させ、ネッ

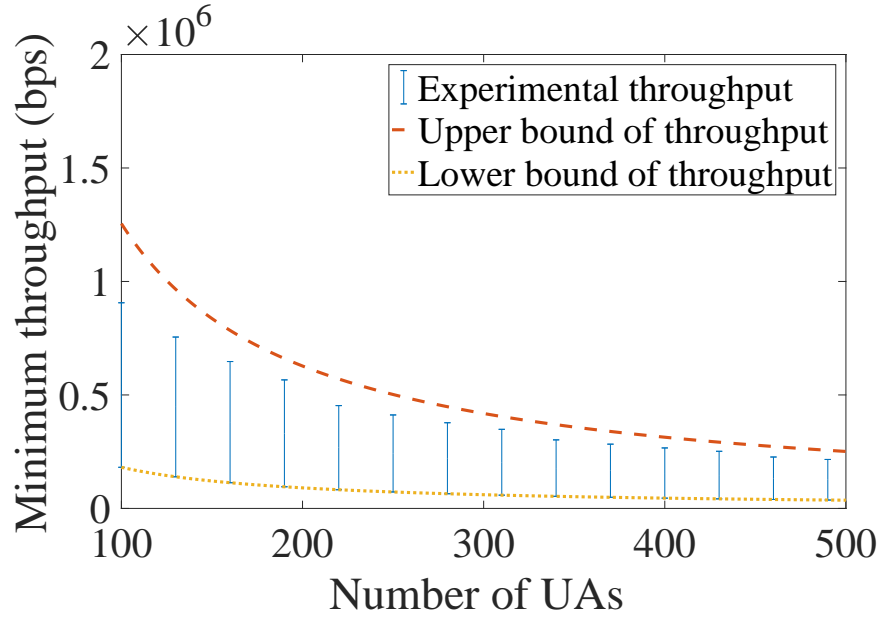


図 3.17: UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が4の場合）

トワーク内の最低スループットを測定する．図 3.16， 3.17， 3.18 にセルグループ数が 3， 4， 7 の場合の実験結果をそれぞれ示す．実験結果に示されるように，提案手法の理論値と実験値がほぼ一致することが確認できた．一部結果で実験値と理論値に差が生じた理由としては，本研究ではタイムスロット数や仮想セル数などの整数値を実数値として扱ったことや，シミュレーションの試行回数が原因として考えられる．

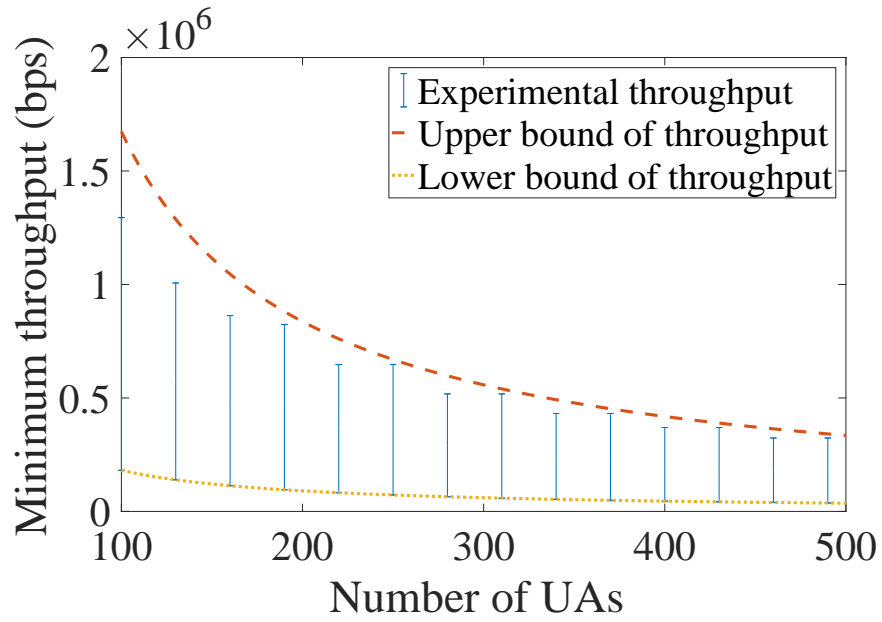


図 3.18: UA の地理的配置によるスループットの変化（セルグループ数が7の場合）

### 3.6 まとめ

本章では、同一もしくは近傍の空域内で運用される多数のUASが、効率的に周波数を共用することを可能とする無線資源割当手法を提案した。本提案手法は仮想的なセル構造を用いて同時通信可能なUAを決定することで、周波数の利用効率を向上するタイムスロット割当を決定する。更に、UAの移動速度やUA-地上局間の距離を基に仮想セル半径やスーパーフレーム長を決定することで、UAの移動環境においても常に全UASのデータ受信を保証する手法の提案を行った。これら提案手法は、MATLABを用いたシミュレーションによって性能評価を行った。シミュレーション結果より、既存手法と比較して高いスループットが得られることが確認できた。また、提案手法を用いた時のスループットを定式化することにより、提案手法が保証可能なスループットの下限值と上限値を示した。



## 第4章

# 複数UAの協調によるメッシュネットワークの構築

### 4.1 はじめに

多数の無人航空機（UA:Unmanned Aircraft）を用いて被災地域や離島などの上空に通信環境を構築するメッシュネットワーク型の無人航空機システム（UAS: Unmanned Aircraft System）では，UAの飛行軌道によって，通信遅延やスループットなどの性能が大きく変化する．そのため，このようなUASでは，ネットワーク性能を向上するための飛行軌道の動的決定手法が必要である．そこで本章では，UAの飛行軌道の決定手法について検討を行う．まず，想定するネットワーク環境についてまとめる．次に，飛行軌道と通信距離の関係からUASを分類し，それぞれのUASにおける課題を指摘する．それぞれの課題に対する解決策として，発生トラヒックや通信リンク容量に基づく動的な飛行軌道決定手法の基本検討を行い，シミュレーションにより有効性について評価する．

## 4.2 想定する無人航空機システム

本節では，想定するメッシュネットワーク型の UAS についてまとめる．また，メッシュネットワーク型 UAS を飛行軌道と通信距離の点から分類し，UA の飛行軌道決定における課題について整理する．

### 4.2.1 想定環境

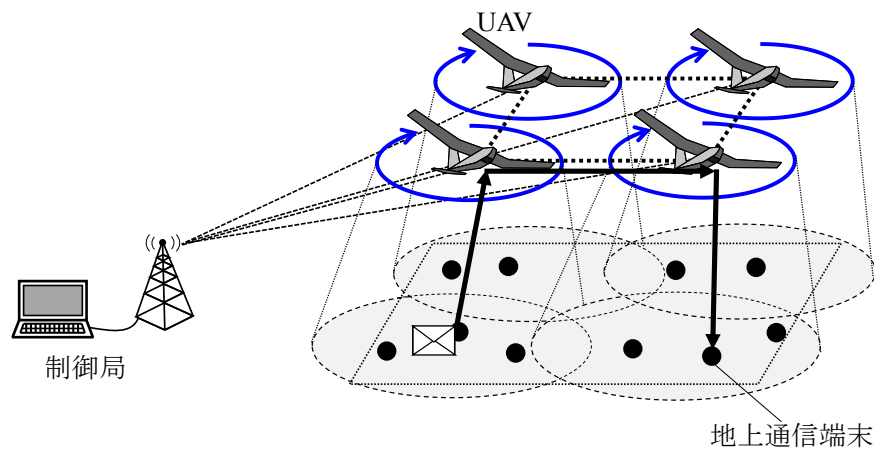


図 4.1: メッシュネットワーク型 UAS の概略

図 4.1 に想定環境を示す．本研究では，複数台の UA によって構成されるメッシュネットワーク型の UAS を想定する．上空に展開された複数台の UA にはデータ中継が可能な通信機器が搭載され，UA 間で相互に通信を行うことでマルチホップ通信を実現する．また，被災地域や離島などの対象となるフィールド全域に通信環境を提供するために，UA には地上通信端末との通信が可能な通信装置が搭載されているものとする．地上の通信端末は他の端末を宛先とした通信を発生させ，

上空に構築されたメッシュネットワーク型 UAS を介して End-to-End の通信を行う。これら UA の飛行軌道は 1 台の制御局による集中管理によって制御されるものとする。UA から制御局に対しては、自機の GPS(Global Positioning System) 情報及びネットワーク制御に必要な情報を送信する。他方、制御局は受信した情報に基づき、UA の飛行軌道を決定し、更新された飛行軌道を各 UA に送信する。本研究では飛行軌道がネットワークに与える影響を評価するために、電波干渉などによるネットワーク性能の変化を除外する。そのため、使用する周波数チャンネルは全ての通信で異なり、相互の電波干渉は発生しないものとする。

### 4.2.2 メッシュネットワーク型無人航空機システムの分類

メッシュネットワーク型の UAS では、飛行軌道と通信距離の関係から UAS を 2 つに分類することができる。1 つが、定点での滞空飛行が可能な回転翼型 UA や VTOL(Vertical Take-Off and Landin) 型の UA を用いたメッシュネットワークである。定点での滞空飛行が可能であるため、隣接 UA や地上通信端末に対して、常に一定の通信品質を保つことができる。また、UA が常時移動する場合においても、UA の飛行軌道が通信距離と比較して十分に小さい場合には、飛行軌道の影響を無視することができるため、このネットワーク形態に分類される。このようなメッシュネットワーク型の UAS では、UA の位置によって UA-UA 間や UA-地上間の通信リンク容量が変化する。そのため、ネットワーク内で発生するトラヒックに応じて UA の位置を制御し、各通信リンクの容量最適化することが必要である。

他方、飛行軌道と通信距離が同程度の大きさを持つメッシュネットワーク型 UAS は、UA の飛行軌道によって通信品質が絶えず変化する。特に、被災地域や離島な



どに対して通信環境を構築する UAS の運用では、UA が対象するフィールド上空を巡回することで、長時間の通信環境構築を行う。このような巡回軌道を持つ複数の UA によって構築されるメッシュネットワークでは、巡回軌道によって UA-UA 間の通信や UA-地上局間の通信品質が変化する。隣接する 2 つの UA は、互いが通信距離内に存在する場合にのみ通信が可能である。通信範囲内に存在しない場合には、通信を行うことができないため、送信できないデータを一時的に蓄積する必要がある。そのため、蓄積伝送を行うための DTN(Delay Tolerant Network) 機能が搭載される。このようなネットワークでは、UA-UA 間や地上-UA 間でのリンク接続とリンク途絶を考慮した、巡回軌道の中心位置と巡回半径の決定が必要である。

そこで本研究では、これらの UAS 環境下における飛行軌道決定手法について提案を行う。第 4.3 節では、UA の飛行軌道が通信距離と比較して十分に小さい環境下において、UA の飛行位置が通信に与える影響について定式化し、最適な UA 位置の決定を行う。第 4.4 節では、UA が巡回軌道を持つ環境下において、貪欲法に基づく巡回軌道の中心位置決定手法について述べる。これらの基本的な飛行軌道決定手法を評価し、本研究では動的飛行軌道決定手法の有効性について検討する。

## 4.3 ネットワークモデルを用いた飛行軌道の決定手法

本節では，UA の通信距離が飛行軌道と比較して十分に大きい環境下において，動的に飛行軌道を決定する手法を提案する．本節で提案する飛行軌道決定手法は，UA の飛行軌道を考慮したネットワークモデルを用いて，最適な UA の位置を決定するものである．

### 4.3.1 ネットワークのモデル化

初めに，UA 飛行軌道のモデル化を行う．想定するネットワーク環境を図 4.2 に示す．本モデル化の目的は，UA の飛行軌道がネットワークの性能に与える影響を数学的に解析することである．しかしながら，メッシュネットワーク型 UAS のネットワーク性能は，通信のルーティングやマルチパスルーティングによっても変化する．そのため，これらルーティングの影響を除外し，飛行軌道がネットワーク性能に与える影響を評価するために，本稿では3台の無人航空機によって構成される UAS を使用する．このネットワークでは，UA が宛先にデータを中継する際には全て最短経路ルーティング（RIP: Routing Information Protocol）によってデータ伝送を行う．そのため，全通信フローは UA-UA 間リンクを最大で1つ利用し，宛先との通信を行う．

モデル化後のネットワークを図 4.3 に示す．本稿では，メッシュネットワーク型 UAS のカバー範囲を3つのセルに分割したネットワークモデルを想定する．全セル内の地上通信端末を漏れなく収容するためには，各 UA は割当てられたセル全域と常に通信可能であることが必要となる．UA の最大通信半径を  $r$ ，UA の飛行

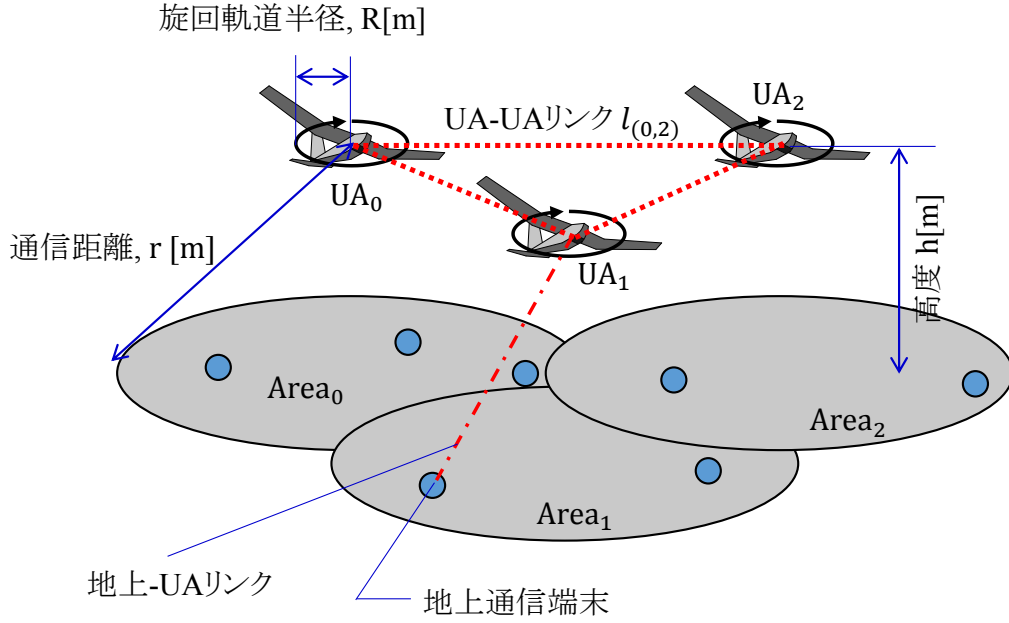


図 4.2: 想定するメッシュネットワーク型 UAS

高度を  $h$  と表す．このとき，UA が移動可能な範囲は以下のように定式化される．

$$\sqrt{(l_{cover} - |O_i - x_i|)^2 + h^2} \geq r \quad (4.1)$$

ここで，上式における  $O_i$  はセル  $i$  の中心位置座標であり， $x_i$  はエリア  $i$  上空を飛行する UA の位置座標である．また， $l_{cover}$  は各 UA に割り当てられたセルの半径を表す．前述したように，本研究では通信距離が飛行軌道と比較して十分に大きい環境を想定しているため，UA の移動可能範囲は以下の条件式に変形することができる．

$$h \ll r \quad (4.2)$$

より，

$$|O_i - x_i| \geq r - l_{cover} \quad (4.3)$$

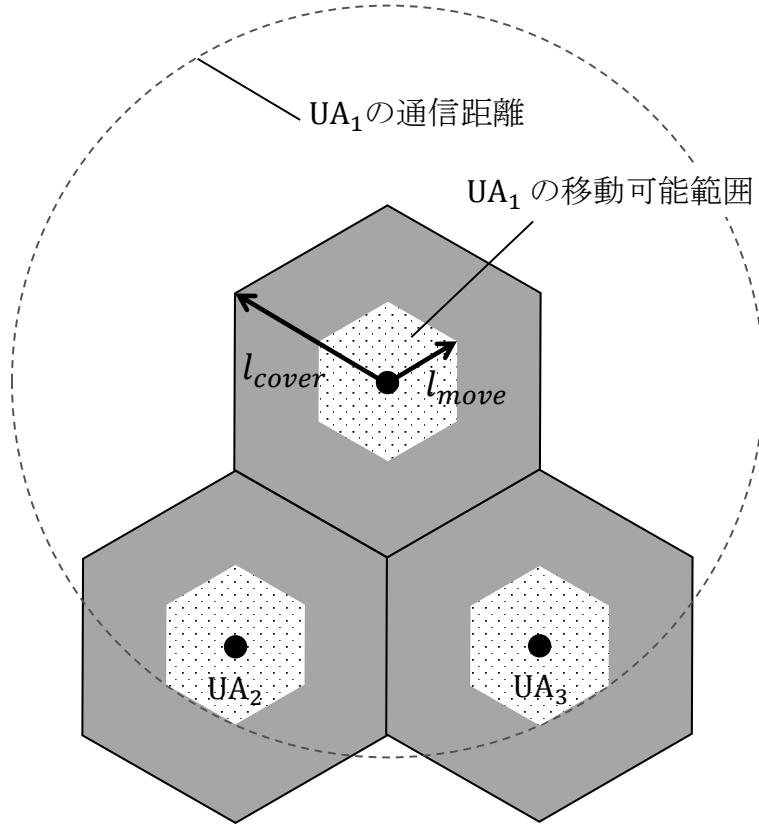


図 4.3: 六角形のセルを用いたネットワークモデル

割り当てられた地上エリア全域に対して常に通信接続を提供するために，上式で定義される範囲内においてのみ UA の飛行軌道を決定可能である．

次に，このようなセル状のネットワークモデルを用いて，通信リンクの容量を定式化する．各 UA-UA 間のリンク容量はシャノン-ハートレーによって導出することができる． $UA_i$  と  $UA_j$  間の通信距離を  $d_{i,j}$  としたとき，リンク容量は以下の

式によって表される．

$$C_{l_{i,j}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{Q \cdot d_{i,j}^{-\alpha}}{N_0} \right) \quad (4.4)$$

ここで  $B$  は帯域幅， $Q$  と  $\alpha$  は電波減衰のパラメータ， $N_0$  は雑音電力を表す．UA-地上間のリンク容量についても同様に算出できる．但し，UA-地上端末間の距離は端末毎に異なるため，リンク容量もまた端末毎に異なる．そこで，地上-UA 間のリンク容量を UA と地上端末間の平均リンク容量として定義する．

$$C_{A_i} = B \iint_{A_i} \log_2 \left( 1 + \frac{Q \cdot |d\mathbf{A} - \mathbf{x}_i|^{-\alpha}}{N_0} \right) \quad (4.5)$$

ここで， $A_i$  は任意の UA  $i$  がカバーする地上の範囲を表す．これらリンク容量の定式化に示されるように，UA の飛行位置によって各通信リンクの容量が変化する．

次に，UA の飛行軌道制御における目的について定式化する．UA の飛行軌道制御は，ネットワーク内で発生するトラヒックに応じて，動的に決定することが目的である．つまり，発生するトラヒックの収容率を最大化する全 UA の飛行位置  $\mathbf{X}$  を決定ことが目的であり，目的関数は以下の式によって表される．

$$\mathbf{X} = \operatorname{argmax} \left( \frac{1}{\sum_{i,j} \rho_{i,j}} \sum_{i,j} \{ \rho_{i,j} - f_{i,j} \} \right) \quad (4.6)$$

ここで， $\rho_{i,j}$  は UA  $i$  下に存在する通信端末から他の UA  $j$  下の通信端末へのリアルタイム通信の要求量の合計値であり，ネットワーク全体の要求量は以下の式によって表される．

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{pmatrix} 0 & \rho_{(0,1)} & \rho_{(0,2)} \\ \rho_{(1,0)} & 0 & \rho_{(1,2)} \\ \rho_{(2,0)} & \rho_{(2,1)} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

同様に， $f_{i,j}$  は UA  $i$  下に存在する通信端末から他の UA  $j$  下の通信端末への通信フローであり，以下の式によって表される．

$$\boldsymbol{f} = \begin{pmatrix} 0 & f_{(0,1)} & f_{(0,2)} \\ f_{(1,0)} & 0 & f_{(1,2)} \\ f_{(2,0)} & f_{(2,1)} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

任意のリンクを通過する通信フローの合計値は常にリンク容量以下となるため、以下の関係式が成り立つ。

$$C_{l_{i,j}} \geq f_{i,j} + f_{j,i} \quad (4.9)$$

$$C_{A_i} \geq \sum_j \{f_{i,j} + f_{j,i}\} \quad (4.10)$$

上記の目的関数及び制約条件の下で UA の飛行位置を決定することで、通信収容率の最大化を図る。

### 4.3.2 評価実験

本小節では、提案手法による UA 飛行軌道の決定手法について性能評価を行う。評価で使用するパラメータ設定値を表 4.1 に示す。評価実験では、各 UA がカバーする地上エリア半径  $l_{\text{cover}}$  を変化させることで、UA の配置密度が通信収容率に与える影響を測定する。通信収容率は、全通信要求の内データ中継に成功した通信要求の割当を示す指標である。比較対象として、フィールドに対して UA を等間隔で配置する均一配置手法を用いる。提案手法は、フィールド全域を格子状に区切り、全通り計算することによって目的関数を最大化する最適な飛行位置を算出する。

上記評価環境における評価結果を図 4.4 に示す。均一配置手法では、UA のカバー対象範囲  $l_{\text{cover}}$  が大きくなると通信収容率が低下することが分かる。提案手法においても同様の傾向が示されているが、均一配置手法と比較して、常に高い通信収容率を達成可能であることが確認できた。この結果は、均一配置手法では、

表 4.1: シミュレーションにおけるパラメータ設定 2

Parameter	value
UA 数	3
UA のカバーエリア半径 ( $l_{\text{cover}}$ )	3000m - 7500m
地上端末数	500
ユーザ間の通信レート	100kbps
電波減衰係数 ( $\alpha$ )	2.0
最大通信半径 ( $r$ )	10000m

UA のカバー対象範囲の拡大に伴い，UA-地上局間リンクや UA-UA 間リンクのリンク容量が低下したことに起因する．他方，提案手法では，発生している通信要求に応じて適切に UA の飛行軌道を決定し，各通信リンクの容量を決定するため，均一配置手法と比較して高い通信収容率となる．以上の評価実験により，UA の通信リンク容量に応じた動的な飛行軌道決定を行う手法の有効性を確認した．

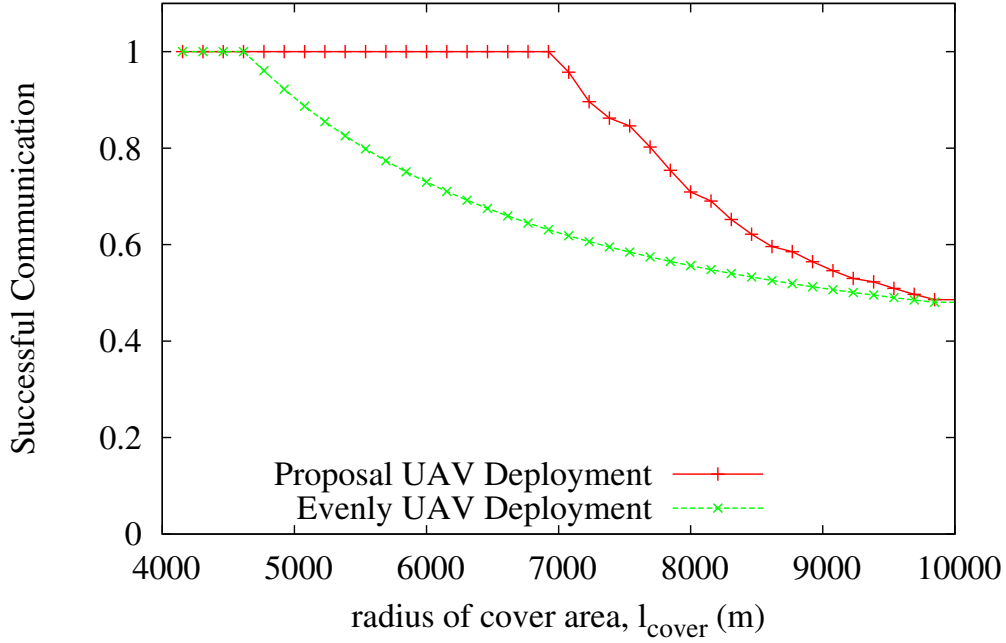


図 4.4: UA の配置密度がネットワーク性能に与える影響

## 4.4 貪欲法による飛行軌道の決定手法

本節では、通信距離と飛行軌道が同程度の大きさを持つメッシュネットワークに対して、動的に飛行軌道を決定する手法を提案する。

### 4.4.1 トラヒックを考慮した飛行軌道の動的制御

通信距離と飛行軌道が同程度の大きさを持つメッシュネットワーク型の UAS では、リンクを構成する 2 つの UA の旋回運動により、リンク接続と切断が発生する。本研究では全ての UA が正円の飛行軌道を持つ環境を想定する。正円の旋回



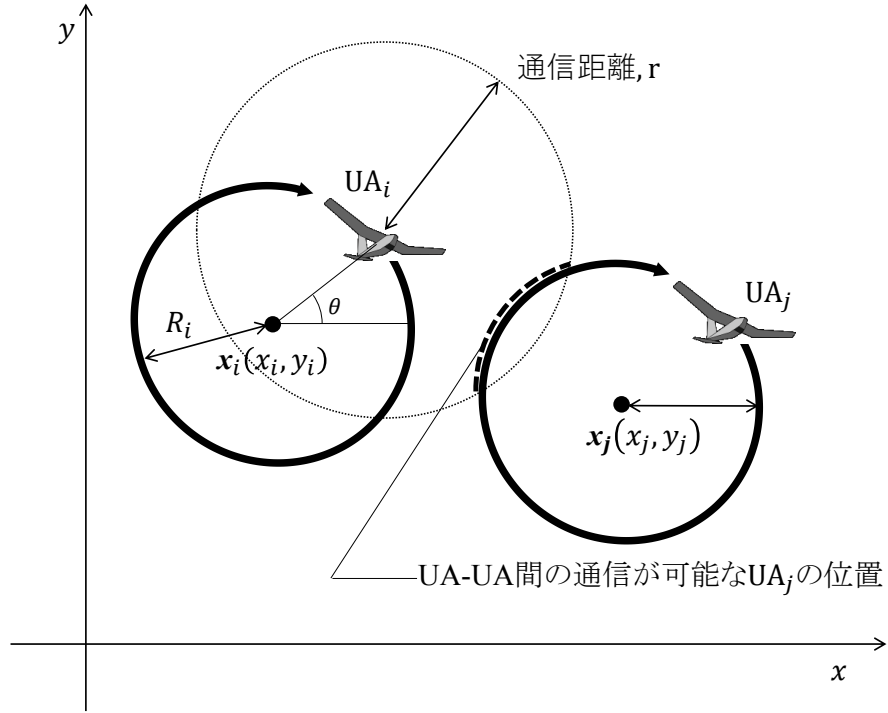


図 4.5: UA-UA 間通信リンクの接続条件

軌道を持つ 2 つの UA が通信可能な条件を図 4.5 に示す．2 つの UA 間の通信における，リンク接続までの遅延時間は旋回軌道の中心位置間距離によって変化する．旋回軌道の中心位置間距離が小さい場合には，通信リンクが確立されるまでの遅延時間は短くなる．更に，旋回軌道の中心位置間距離は，1 回の接続で送信可能なデータ量の期待値にも影響を与える．中心位置間距離が小さいほど，1 回の接続で送信可能なデータ量が増大する．

旋回軌道半径によってもその通信の性質は大きく変化する．更に，旋回軌道半径は UA がカバーするフィールドサイズにも影響を与える．そのため，通信距離と飛行軌道が同程度の大きさを持つメッシュネットワーク型の UAS では，これらの通信性能を考慮した旋回軌道中心位置と旋回半径を決定する手法が必要となる．

そこで本研究では，UA-UA 間通信リンクの負荷を基に UA の位置を決定することで，通信遅延を低減する飛行軌道の動的制御手法を提案する．提案手法は，ボトルネックとなっている通信リンクを特定し，通信リンクを構成する UA の巡回軌道中心位置間距離を短くするように飛行軌道制御することで，ボトルネックの解消を行う．更に，カバーできない地上ノードが生じた場合には，UA の巡回軌道半径を増加することで，全地上通信端末を収容する．このような，貪欲法に基づく飛行軌道制御手法により，本研究では End-to-End の通信品質を向上する．

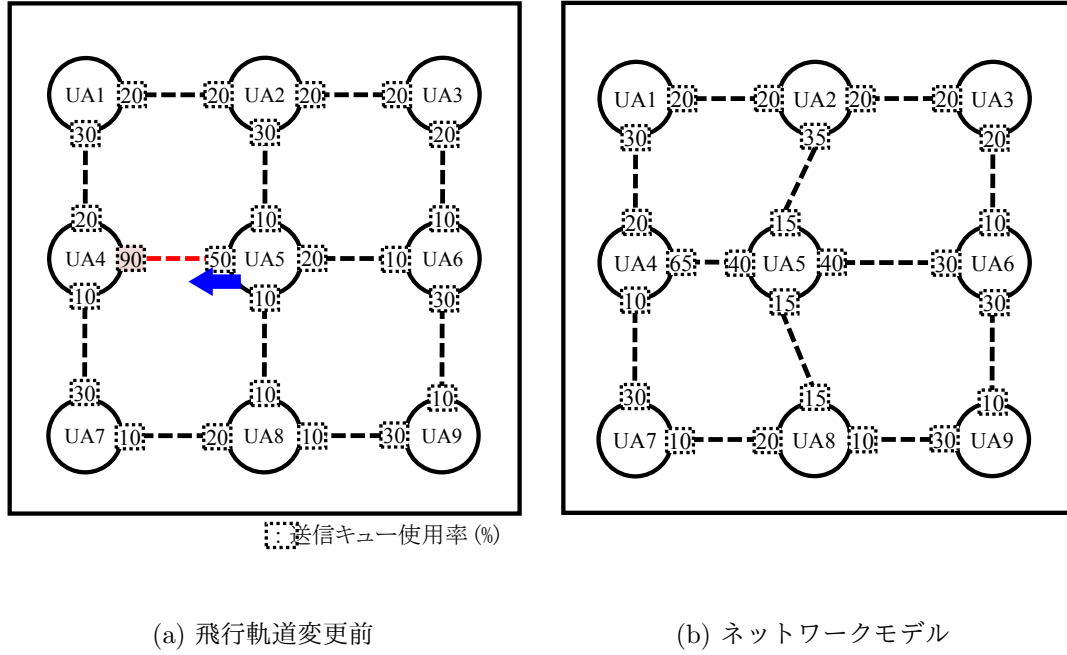


図 4.6: 貪欲法による UAS の飛行軌道決定

提案手法の概要を図 4.6 に示す．UA-UA 間通信リンクの負荷を示す指標として，各通信リンクの送信キュー使用率を使用する．初めに，提案手法ではネットワーク内の全送信キューに対して，使用率が閾値  $Q$  超過するかを調べる．キュー

使用率が閾値を超過する送信リンクが存在する場合には、最もキュー使用率の大きい送信キューを持つ UA を選択する。本手法ではこの送信リンクをビジーリンクと定義する。次に、ビジーリンクを構成するもう一方の UA を選択し、通信リンクを構成する UA の巡回軌道中心位置間距離が短くなる方向へ、巡回軌道の中心位置を一定値  $\Delta D$  移動させる。中心の更新によりカバーできない地上端末が生じた場合には、巡回半径を増加させることで地上端末を収容する。

### 4.4.2 評価実験

上記の貪欲法に基づく UA の位置決定手法について評価を行い、UA 飛行軌道動的制御手法の有効性について評価する。本評価実験では、9～49 台の格子状に配置された UA を用いて行う。実験で使用するパラメータを図 4.2 に示す。比較対象として、フィールド内に UA を等間隔に配置する均一配置手法を用いる。ネットワーク内で発生する通信フローに地理的な偏りを設けシミュレーションを行うことで、動的飛行軌道の有効性について評価する。

上記評価環境において、End-to-End の通信遅延を測定した結果を図 4.7 に示す。図 4.7 に示されるように、提案手法では UA の均一配置手法と比較して低い通信遅延を達成可能である。また、End-to-End の通信リンクが接続される確立を測定した結果を図 4.8 に示す。End-to-End の通信リンク接続率においても、提案手法が UA の均一配置手法よりも高い測定結果となることが確認された。上記結果は、本提案手法ではボトルネックとなる通信リンクを解消するように UA の飛行軌道を動的に変更するため、通信量の多い UA-UA 間リンクは通信品質を向上するように制御されたことに起因する。

そのため、これらシミュレーション結果より、トラヒックの偏りが大きい環境

表 4.2: シミュレーションにおけるパラメータ設定 3

Parameter	value
飛行速度	40km/h
地上フィールドサイズ	1000m × 1000m
UA 数	9-49
通信範囲	150m
旋回軌道半径の初期値	100m
$Q$	70
$\Delta D$	20m

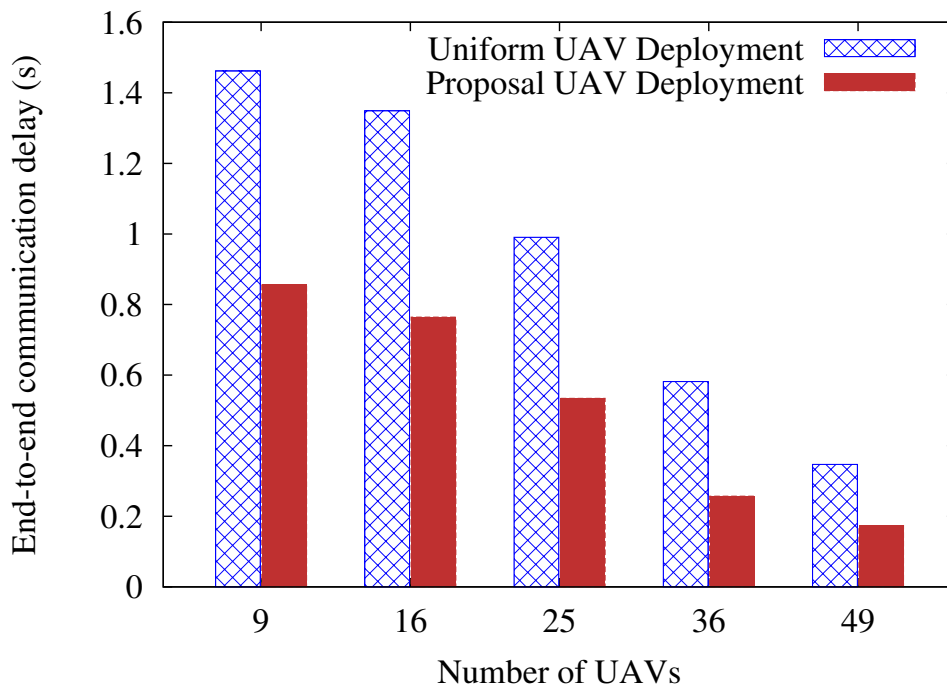


図 4.7: End-to-End の通信遅延

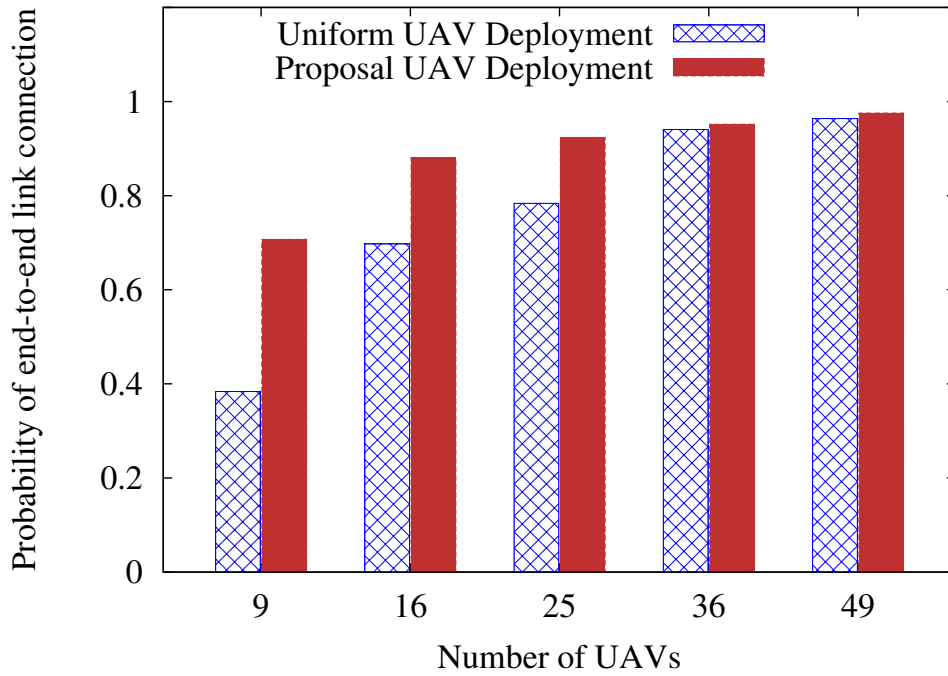


図 4.8: End-to-End の通信リンク接続率

下では UA 飛行軌道を動的に制御することで，遅延や End-to-End のリンク接続率を向上可能であることが確認された．

## 4.5 まとめ

本章では，多数の UA によって構築されるメッシュネットワーク型の UAS における，ネットワークの動的制御手法について論じた．メッシュネットワーク型の UAS では，End-to-End の通信性能を向上するために UA の飛行軌道を動的に決定する必要性について述べた．また，UA の飛行軌道からメッシュネットワーク型 UA を整理し，それぞれの UAS における課題について指摘した．これら課題に対する解決策として，本章では，トラヒックに応じた UA 軌道の動的決定手法について提案した．シミュレーションにより提案手法の有効性について評価し，飛行軌道制御の必要性について示した．



## 第5章

### 結論

通信技術や制御技術等の発達により，安価で高性能な UAS は爆発的に普及し，様々な産業において利用が期待されるようになった．最近では，法整備や周波数帯域の整備が進められ，郊外のみならず有人地帯においても利用可能な環境が整いつつある．しかし，UAS が利用可能な周波数帯域には限りがあり，今後の更なる UAS の利用拡大を想定すると周波数を効率的に利用する手法が必要である．

本研究では，多数の UAS が近傍空域内に展開される環境下におけるネットワークの動的制御手法に着目した．以下は，本論文の各章を概括したものである．

第1章では，序論として，本研究の背景とその目的を述べ，本論文の構成を示した．

第2章では，複数の UAS によって構成されるネットワークについてネットワーク形態から分類した．それぞれの UAS 内で閉じた通信を行うネットワーク形態では，多数の UAS が近傍空域内で運用される環境において周波数共用が課題となることを指摘した．関連研究として通信リンクの空間多重手法を紹介し，関連研究では UA の持つ高いモビリティによって空間多重が維持できなくなることを示した．他方，多数の UA を用いてメッシュネットワークを構築する利用形態に



においては、UA の飛行軌道によって通信性能が変化することを示し、飛行軌道を決定する手法が必要であることを示した。

第3章では、仮想セルを用いた空間多重手法について提案を行った。本手法では、離れたセル内の UA 同士が同じタイムスロットを利用して通信することによって周波数利用効率を向上するものであることを述べた。UA がモビリティを持つ環境下においても常に空間多重を保証するために、最適な仮想セル半径の導出方法について述べた。次に、各 UAS のスループットを最大化する方法として、タイムスロットの更新間隔及びタイムスロット割当について最適化を行った。シミュレーションによる性能評価の結果、本提案は周波数利用効率を向上させることを確認した。また、UA の地理的分布がスループットへ与える影響を解析するために、提案手法を利用した際にスループットの取りうる値として下限値と上限値を定式化することで、提案手法の性能について理論的に解析を行った。

第4章では、複数の UA によって構成されるメッシュネットワークにおいて、UA の飛行軌道を動的に決定する手法について述べた。初めに、通信リンクや通信フロー等についてネットワークのモデル化を説明した。次に、モデル化したネットワークを用いて、発生しているトラヒックを基に最適な UA の位置を決定する最適化手法の提案を行った。シミュレーションによる性能評価の結果、トラヒックを考慮しない手法と比較して、高いスループットを達成可能であることを確認した。次に、UA-UA 間の通信リンクの負荷を基に UA の飛行軌道を決定する手法について提案を行い、シミュレーションによって提案手法の有効性を確認した。

第5章では、結論として、本論文を総括した。

以上のように、本研究では、通信環境や UA のモビリティを基にしたネットワークの動的制御手法の提案を行った。本研究の成果は、今後の UAS による多様な

サービスの実現に寄与するものであると考えられる.



# 著作物利用許諾

本論文で用いている図表等は出版済みの文献から再利用したものを含む，本論文で再利用した文献のリスト及び著作物利用許諾を以下に示す．

- Daisuke Takaishi, Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Fumie Ono, and Ryu Miura, “Virtual Cell-Based Resource Allocation for Efficient Frequency Utilization in Unmanned Aircraft Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, In press.
- Zubair Md. Fadlullah, Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “A Dynamic Trajectory Control Algorithm for Improving the Communication Throughput and Delay in UAV-aided Networks,” *IEEE Network*, vol. 30, pp. 100-105, Jan. 2016.
- Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “Towards Energy Efficient Big Data Gathering in Densely Distributed Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*, vol. 2, no. 3, pp. 388-397, Sept. 2014.

2018/1/17

Rightslink® by Copyright Clearance Center



RightsLink®

Home Create Account Help

**Title:** Virtual Cell-Based Resource Allocation for Efficient Frequency Utilization in Unmanned Aircraft Systems  
**Author:** Daisuke Takaishi  
**Publication:** Vehicular Technology, IEEE Transactions on  
**Publisher:** IEEE  
**Date:** Dec 31, 1969  
Copyright © 1969, IEEE

**LOGIN**  
If you're a [copyright.com user](#), you can login to RightsLink using your copyright.com credentials. Already a [RightsLink user](#) or want to [learn more?](#)

### Thesis / Dissertation Reuse

**The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:**

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 Copyright Clearance Center, Inc. All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#).  
Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)

2018/1/17

Rightslink® by Copyright Clearance Center



RightsLink®

Home

Create Account

Help



**Title:** A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-aided networks  
**Author:** Zubair Md. Fadlullah  
**Publication:** IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking  
**Publisher:** IEEE  
**Date:** January-February 2016  
Copyright © 2016, IEEE

**LOGIN**  
If you're a [copyright.com user](#), you can login to RightsLink using your copyright.com credentials. Already a [RightsLink user](#) or want to [learn more?](#)

### Thesis / Dissertation Reuse

**The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:**

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 Copyright Clearance Center, Inc. All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#).  
Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)

2018/1/17

Rightslink® by Copyright Clearance Center



RightsLink®

Home

Create Account

Help



**Title:** Toward Energy Efficient Big Data Gathering in Densely Distributed Sensor Networks  
**Author:** Daisuke Takaishi  
**Publication:** IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing  
**Publisher:** IEEE  
**Date:** Sept. 2014

Copyright © 2014, IEEE

**LOGIN**  
If you're a **copyright.com** user, you can login to RightsLink using your copyright.com credentials. Already a **RightsLink user** or want to [learn more?](#)

### Thesis / Dissertation Reuse

**The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:**

*Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

*Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:*

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 Copyright Clearance Center, Inc. All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#). Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)

# 発表文献一覧

## 学術論文

1. Daisuke Takaishi, Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Fumie Ono, and Ryu Miura, “Virtual Cell-Based Resource Allocation for Efficient Frequency Utilization in Unmanned Aircraft Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, In press.
2. Zubair Md. Fadlullah, Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “A Dynamic Trajectory Control Algorithm for Improving the Communication Throughput and Delay in UAV-aided Networks,” *IEEE Network*, vol. 30, pp. 100-105, Jan. 2016.
3. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “Towards Energy Efficient Big Data Gathering in Densely Distributed Sensor Networks,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (TETC)*, vol. 2, no. 3, pp. 388-397, Sept. 2014.

## その他誌上発表

1. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Fumie Ono, and Ryu Miura, “Network Construction with Unmanned Aerial Vehicles for Disaster Areas,” *IEEE Communications Society SSC Newsletter*, vol. 24, no. 1, pp. 9-12, Jun. 2014.



## 国際学会（査読あり）

1. Hiroki Nishiyama, Yuichi Kawamoto, and Daisuke Takaishi, “On OFDM-Based Resource Allocation in LTE Radio Management System for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs),” *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC2017-Fall)*, Toronto, Canada, Oct. 2017.
2. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “A Dynamic Trajectory Control Algorithm for Improving the Probability of End-to-End Link Connection in Unmanned Aerial Vehicle Networks,” *International Conference on Personal Satellite Services (PSATS2014)*, Genova, Italy, July 2014.
3. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, and Ryu Miura, “On the Effect of Data Request Message Flooding in Dense Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink,” *IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC 2013 Fall)*, Las Vegas, Nevada, USA, Sept. 2013.

## 国際学会（査読なし）

1. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “Traffic-aware Trajectory Control Scheme for Reliable UAV-aided Networks,” *Annual Workshop on A3 Foresight Program*, Pyongchang Korea, Jul. 2016. (口頭発表のみ)
2. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “A Study on Dynamic Trajectory Control for Improving Network Connectivity in Unmanned Aerial Vehicle Networks,” *Annual Workshop on A3 Foresight Program*, Busan, Korea, July. 2014. (口頭発表のみ)
3. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “A Study on The Effect of UAS Trajectory on The End-to-End Delay in UAS Networks,” ,” *Annual Workshop on A3 Foresight Program*, Sapporo, Japan, Jul. 2013. (口頭発表のみ)

4. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, “A Study on a Load Distribution by Orbit Controls in UAV Networks,” , ” *Annual Workshop on A3 Foresight Program*, Jeju, Korea, Feb. 2013. (口頭発表のみ)

## 研究会

1. 高石 大介, 川本 雄一, 西山 大樹, 加藤 寧, “無人航空機システムにおける仮想的なセル構造を用いた無線資源割当手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, Mar. 2018.
2. 高石 大介, 西山 大樹, 加藤 寧, “無人航空機システムにおける高効率な無線資源利用のためのグルーピングに関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 433, RCC2016-66, pp. 13-16, Jan. 2017.
3. 高石 大介, 西山 大樹, 加藤 寧, “無人航空機によるネットワーク構築の分類と固定系無人航空機ネットワークの性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 144. SAT2016-29, pp. 99-102, Jul. 2016.
4. Daisuke Takaishi, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, “A Study on Trajectory Control Scheme for Improving Probability of Link Connection in UAV Networks,” IEICE Tech. Rep., vol. 113, no. 258, SAT2013-37, pp. 39-44, Oct. 2014.
5. 高石 大介, 西山 大樹, 加藤 寧, “マルチホップリレー通信における端末位置の高低差の影響評価,” 電子情報通信学会総合大会,” 電子情報通信学会総合大会, B-3-24, Mar. 2014.
6. 西山 大樹, 高石 大介, 加藤 寧, “自律分散型通信システムとしての「スマホ de リレー」,” 電子情報通信学会総合大会, DS-2-6, Mar. 2014.
7. 高石 大介, 西山 大樹, 加藤 寧, 三浦 龍, “無人航空機ネットワークのための軌道制御アルゴリズム,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 152, SAT2013-12, pp. 5-10, Jul. 2013.

## 受賞

1. 東北大学 総長賞, 2015 年 3 月
2. 東北大学大学院情報科学研究科 研究科長賞, 2015 年 3 月
3. 電子情報通信学会総合大会 学術奨励賞 “マルチホップリレー通信における  
端末位置の高低差の影響評価,” 2015 年 3 月
4. A3 Foresight Program 2014 Annual Workshop Best Presentation Award, Jul.  
2014.
5. IEEE VTS Student Student Paper Award “On the Effect of Data Request Mes-  
sage Flooding in Dense Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink,” Sep.  
2013.

## 参考文献

- [1] 首相官邸, “ロボット新戦略,”  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf>
- [2] M. Erdelj, E. Natalizio, K. R. Chowdhury and I. F. Akyildiz, “Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management,” in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 24-32, Jan. 2017.
- [3] Y. Zhou, N. Cheng, N. Lu and X. S. Shen, “Multi-UAV-Aided Networks: Aerial-Ground Cooperative Vehicular Networking Architecture,” in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 36-44, Dec. 2015.
- [4] 伊藤亜聖・春原久徳 (2016) 『世界のドローンビジネス調査報告書 2017』, インプレス総合研究所
- [5] 国土交通省, “ドローンで使用されている主な無線通信システム,”  
<http://www.mlit.go.jp/common/001154535.pdf>
- [6] 総務省, “小型無人機(ドローン),”  
<http://www.mlit.go.jp/common/001154535.pdf>
- [7] A. E. A. A. Abdulla, Z. M. Fadlullah, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono and R. Miura, “An Optimal Data Collection Technique for Improved Utility in UAS-aided Networks,” *The 33rd Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Toronto, Canada, May, 2014.

- 
- [8] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647-1650, Aug. 2016.
- [9] L. Gupta, R. Jain and G. Vaszkun, "Survey of Important Issues in UAV Communication Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016.
- [10] F. Ono, H. Ochiai and R. Miura, "A Wireless Relay Network Based on Unmanned Aircraft System with Rate Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 7699-7708, Nov. 2016.
- [11] Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Throughput Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996, Dec. 2016.
- [12] D. H. Choi, S. H. Kim and D. K. Sung, "Energy-efficient maneuvering and communication of a single UAV-based relay," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 3, pp. 2320-2327, Jul. 2014.
- [13] A. Mehrabi and K. Kim, "Maximizing Data Collection Throughput on a Path in Energy Harvesting Sensor Networks Using a Mobile Sink," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 15, no. 3, pp. 690-704, Mar. 2016.
- [14] B. Suh and S. Berber, "Rendezvous points and routing path-selection strategies for wireless sensor networks with mobile sink," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 2, pp. 167-169, 2016.
- [15] C. Tunca, S. Isik, M. Y. Donmez and C. Ersoy, "Ring Routing: An Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 9, pp. 1947-1960, Sep. 2015.
- [16] F. Tashtarian, M. H. Yaghmaee Moghaddam, K. Sohraby and S. Effati, "On Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks in Event-Driven Applications

- With Mobile Sinks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 7, pp. 3177-3189, Jul. 2015.
- [17] P. Chanak, I. Banerjee and R. S. Sherratt, “Simultaneous mobile sink allocation in home environments with applications in mobile consumer robotics,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 61, no. 2, pp. 181-188, May 2015.
- [18] H. Nishiyama, A. Takahashi, N. Kato, K. Nakahira and T. Sugiyama, “Dynamic Replication and Forwarding Control Based on Node Surroundings in Cooperative Delay-Tolerant Networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 26, no. 10, pp. 2711-2719, Oct. 2015.
- [19] Y. Yun, Y. Xia, B. Behdani and J. C. Smith, “Distributed Algorithm for Lifetime Maximization in a Delay-Tolerant Wireless Sensor Network with a Mobile Sink,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 10, pp. 1920-1930, Oct. 2013.
- [20] N. Hossein Motlagh, T. Taleb and O. Arouk, “Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicles-Based Internet of Things Services: Comprehensive Survey and Future Perspectives,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 899-922, Dec. 2016.
- [21] U. Zengin and A. Dogan, “Real-Time Target Tracking for Autonomous UAVs in Adversarial Environments: A Gradient Search Algorithm,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 2, pp. 294-307, Apr. 2007.
- [22] H. Kwon, J. Yoder, S. Baek, S. Gruber and D. Pack, “Maximizing Target Detection under Sunlight Reflection on Water Surfaces with an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle,” *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, United States, pp. 17-24, Jul. 2013.
- [23] A. M. Samad, N. Kamarulzaman, M. A. Hamdani, T. A. Mastor and K. A. Hashim, “The potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for civilian and map-

- ping application,” *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, Shah Alam, 2013, pp. 313-318. 2013.
- [24] R. Laufer and L. Kleinrock, “The Capacity of Wireless CSMA/CA Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 3, pp. 1518-1532, June 2016.
- [25] M. Hadded, P. Muhlethaler, A. Laouiti, R. Zagrouba and L. A. Saidane, “TDMA-Based MAC Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey, Qualitative Analysis, and Open Research Issues,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2461-2492, 2015.
- [26] P. Mitran, H. Ochiai and V. Tarokh, “Space-Time Diversity Enhancements using Collaborative Communications,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2041-2057, June 2005.
- [27] A. Sgora and D. D. Vergados, “Handoff Prioritization and Decision Schemes in Wireless Cellular Networks: a Survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 4, pp. 57-77, 2009.
- [28] L Budzisz et al., “Dynamic Resource Provisioning for Energy Efficiency in Wireless Access Networks: A Survey and an Outlook,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2259-2285, 2014.
- [29] H. Sun, M. Wildemeersch, M. Sheng and T. Q. S. Quek, “D2D Enhanced Heterogeneous Cellular Networks with Dynamic TDD,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 8, pp. 4204-4218, Aug. 2015.
- [30] R. Nelson and L. Kleinrock, “Spatial TDMA: A Collision-Free Multihop Channel Access Protocol,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 33, no. 9, pp. 934-944, Sep. 1985.
- [31] K. Jain, J. Padhye, V. Padmanabhan and L. Qiu, “Impact of Interference on Multihop Wireless Network Performance”, *Proc. ACM Mobicom*, pp. 66-80, 2003.

- 
- [32] P. Phunchongharn and E. Hossain, "Distributed Robust Scheduling and Power Control for Cognitive Spatial-Reuse TDMA Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 10, pp. 1934-1946, Nov. 2012.
- [33] P. Bjorklund, P. Varbrand and Di Yuan, "Resource Optimization of Spatial TDMA in Ad Hoc Radio Networks: a Column Generation Approach," *The 23rd Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, San Francisco, United States, vol. 2, pp. 818-824, Jul. 2003.
- [34] K. Papadaki and V. Friderikos, "Robust Scheduling in Spatial Reuse TDMA Wireless Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 4767-4771, Dec. 2008.
- [35] C. C. Lin, L. Shu and D. J. Deng, "Router Node Placement With Service Priority in Wireless Mesh Networks Using Simulated Annealing With Momentum Terms," *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 1402-1411, Dec. 2016.
- [36] M. N. Smadi, S. C. Ghosh, A. A. Farid, T. D. Todd and S. Hranilovic, "Free-Space Optical Gateway Placement in Hybrid Wireless Mesh Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 14, pp. 2688-2697, Jul. 2009.
- [37] B. Aoun, R. Boutaba, Y. Iraqi and G. Kenward, "Gateway Placement Optimization in Wireless Mesh Networks With QoS Constraints," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 11, pp. 2127-2136, Nov. 2006.
- [38] T. Ngo, H. Nishiyama, N. Kato, Y. Shimizu, K. Mizuno and T. Kumagai, "On the throughput evaluation of wireless mesh network deployed in disaster areas," *2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, San Diego, CA, 2013, pp. 413-417, 2013.
- [39] S. Vural, D. Wei and K. Moessner, "Survey of Experimental Evaluation Studies for Wireless Mesh Network Deployments in Urban Areas Towards Ubiquitous Internet," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 223-239, 2013.



- [40] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, Jul. 1948.
- [41] F. Ono, T. Kagawa, H. Tsuji, R. Miura and F. Kojima, “Measurements on C-band air-to-air channel for coexistence among multiple unmanned aircraft systems,” 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, 2017, pp. 1160-1164.

# 謝辞

本稿は、東北大学大学院情報科学研究科情報通信技術論（加藤・西山研究室）において筆者が行った研究を博士学位論文としてまとめたものである。

本研究を行うに当たり、指導教員を務めて頂いた東北大学大学院情報科学研究科 教授 加藤寧先生には、大変貴重な研究機会を与えて頂き、更には終始熱心な御指導・御鞭撻を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 教授 周曉先生、並びに 菅沼拓夫先生には、本論文をまとめるに当たり多大なるご指導を賜りました。ここに心より深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 准教授 西山大樹先生には、研究の進め方に始まり学術論文の書き方に至るまで多大なるご指導を賜りました。また、日常生活の中でも様々な御助言を頂き、成長のきっかけを与えて頂きました。ここに心より深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 准教授 Zubair Md. Fadlullah 先生には、日頃のゼミや研究生生活、英語論文執筆において大変お世話になりました。ここに心より深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 助教 川本雄一先生には、本研究全般に渡り日頃から御討論・御助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科 金子和真氏には、同期そして友人として、日頃から御厚意を頂きました。深く感謝申し上げます。

東北大学大学院情報科学研究科事務補佐員 白石元子氏並びに、技術補佐員 千葉香氏、そして研究室の皆様には、日々研究を進める上で様々な形で御支援と御協力を頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

最後に、これまで様々な面で私を支え、温かく見守り続けて下さった両親に対し、心からの感謝を申し上げます。

本研究の完成は、皆々様の御力添えの賜物です。関係各位に対し、ここに深く感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

2018 年 1 月